Studienarbeit Nr. 21

Autonome Kolonnenfahrt auf Autobahnen

Stand der Technik, Umsetzung, Auswirkungen auf den Verkehrsfluss

Bearbeiter:

B. Eng. Stefan Klaußner

B. Eng. Philipp Irtenkauf

Betreuer: Dipl.-Ing. Jochen Lohmiller

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich

Juli 2013

Universität Stuttgart

Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit einem System zur autonomen Kolonnenfahrt auf Autobahnen. Darunter wird eine Kolonne aus einem Führungsfahrzeug und einem oder mehreren Folgefahrzeugen verstanden, die sich elektronisch durch Fahrzeugkommunikation sowie Fahrerassistenzsysteme koppeln und einander mit geringem Abstand folgen. Die Folgefahrzeuge befinden sich dabei in einem hoch- oder vollautomatisierten Fahrmodus, der den Fahrern die Ausübung fahrfremder Tätigkeiten erlaubt.

Wie die durchgeführten Berechnungen und Simulationen zeigen, kann die autonome Kolonnenfahrt zu einer Verbesserung des Verkehrsablaufs durch höhere Kapazitäten der Autobahnen sowie durch eine gleichmäßigere Fahrweise führen. Letzteres führt auch in Verbindung mit einem verringerten Luftwiderstand zur Reduktion des Energiebedarfs. Dadurch ergeben sich auch Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit, den Fahrkomfort und schlussendlich auf die Volkswirtschaft.

Die Längs- und Querführung der Folgefahrzeuge einer Kolonne werden mindestens als hochautomatisiert betrachtet. Die hierfür notwendigen technischen Systeme sind in Form verschiedener Fahrerassistenzsysteme bereits verfügbar oder kurz vor der Serieneinführung. Für die elektronische Kopplung der Kolonnenfahrzeuge wird die Fahrzeugkommunikation verwendet. Ein herstellerübergreifender Übertragungsstandard auf WLAN-Basis befindet sich derzeit in der Serienentwicklung. Während auf der technischen Seite vor allem noch Themen wie Standardisierung und Systemabsicherung bearbeitet werden müssen, sind auf der rechtlichen Seite noch prinzipielle Aspekte zum automatisierten Fahren sowie zur Haftung bei Unfällen zu klären.

Neben der Betrachtung der technischen Komponenten in Form bereits verfügbarer oder in Entwicklung befindlicher Assistenzsysteme werden grundlegende Überlegungen zur autonomen Kolonnenfahrt vorgestellt. Hierzu gehören u.a. die Ermittlung des Folgeabstands der gekoppelten Kolonnenfahrzeuge sowie verschiedene Handlungsstrategien für Interaktionen innerhalb der Fahrzeugkolonnen und Interkationen mit anderen nicht gebundenen Verkehrsteilnehmern.

© VuV 2013

Abstract

This research paper presents a system for autonomous driving in platoons on motorways. A platoon consists of a leading vehicle and at least one following vehicle. The vehicles are electronically coupled by Car-to-Car-Communication and driver assistance systems. In order to allow the driver to concentrate on non-driving related activities, the following vehicles operate in a highly- or fully-automatic driving mode.

The executed calculations and simulations show that the autonomous driving in platoons leads to improvements in traffic flow due to higher capacities of the motorways and a more steady way of driving. The latter leads, linked with the reduction of the aerodynamic drag, to a reduction of the energy demand. Thus, positive effects on traffic safety, on driving comfort and finally on the national economy arise.

The longitudinal and lateral guidance of the following vehicles can be considered as at least highly automated. The technical systems necessary for this are already available in form of different driver assistance systems or are in development. For the electronic coupling of the vehicles, Car-to-Car-Communication is used. A manufacturer-independent broadcast-standard based on WLAN is currently in serial development. While on the technical side issues like standardization and system validation need to be considered, the legal side has to resolve basic aspects of autonomous driving and liabilities in case of accidents.

Aside from the observation of the technical components in form of driver assistance systems, which already exist or are in development, basic considerations on autonomous driving in platoons are presented. This includes the calculation of the following distance of the linked platoon vehicles, as well as several action strategies for interactions within the platoon and interactions with vehicles that are not linked to the platoon.

© VuV 2013

Selbständigkeitserklärung

Hiermit erklären wir, dass wir die vorliegende Arbeit eigenständig verfasst haben und keine anderen Hilfestellungen oder Quellen als die angegebenen in Anspruch genommen haben.

Insbesondere haben wir keinen bezahlten Dienst mit der Anfertigung der gesamten Arbeit oder Teilen der Arbeit beauftragt.

Die Aufgaben wurden folgendermaßen bearbeitet:

Stefan Klaußner: Kapitel 4, 5, 6, 9, 10.4, 10.5

Philipp Irtenkauf: Kapitel 2, 3, 7, 8, 10.2, 10.3.

Nicht aufgeführte Kapitel wurden gemeinsam erarbeitet.

Stuttgart, im Juli 2013

Stefan Klaußner

Philipp Irtenkauf

Inhalt

Glossar **9**

1 Einleitung **13**

Teil 1 – Stand der Technik **15**

2 Fahrerassistenzsysteme – Stand der Technik **16**

2.1 Assistenzsysteme zur Längsführung von Fahrzeugen 17

2.1.1 Adaptive Geschwindigkeitsregelanlagen 17

2.1.2 Bremssysteme 25

2.1.3 Auswirkungen von Fahrerassistenzsystemen zur Längsführung 33

2.2 Assistenzsysteme zur Querführung von Fahrzeugen 34

2.2.1 Lenksysteme 35

2.2.2 Spurführungssysteme 38

2.2.3 Spurwechselsysteme 42

2.2.4 Auswirkungen von Fahrerassistenzsystemen zur Querführung 45

2.3 Kombinierte Systeme zur Längs- und Querführung von Fahrzeugen 45

2.3.1 Manöverbasierte Fahrerassistenzsysteme 47

2.3.2 Manöverbasierte Fahrzeugführungssysteme 47

2.4 Ausblick 51

3 Sensorik für die Umfelderfassung **52**

3.1 Erfassungsbereiche der Umfeldsensorik 52

3.2 Radar-Sensorik 54

3.3 LIDAR-Sensorik 54

3.4 Maschinelles Sehen 55

3.5 Datenfusion verschiedener Sensoren 56

4 Informationserfassung für die Fahrzeugkommunikation **58**

4.1 Wirkungsbereiche verschiedener Informationssysteme 58

4.2 Informationserfassung 60

4.2.1 Informationserfassung mittels Fahrzeugsensorik 60

© VuV 2013

4.2.2 Informationserfassung mittels Fahrzeugnavigation 62
4.2.3 Informationserfassung aus Umfeld- und Verkehrsdaten 66

5 Fahrzeugkommunikation 70
5.1 Definition Fahrzeugkommunikation 70
5.2 Anwendungsmöglichkeiten 71
5.3 Übertragung von Verkehrsmeldungen 71
5.3.1 Universelle Nachrichtenübermittlung 72
5.3.2 Individuelle Nachrichtenübermittlung 75
5.4 Automatische Notrufsysteme 77
5.5 Car-to-X-Communication 80
5.5.1 Beschluss des Car-to-Car-Communication-Consortium 80
5.5.2 Nachrichtenübermittlung durch Ad-Hoc-Netzwerke 81
5.5.3 Herausforderungen für die Car-to-X-Communication 84
5.5.4 Systembeschreibung der Car-to-X-Communication 85
5.5.5 Übertragungssicherheit und Datenschutz 88
5.5.6 Forschungsprojekt sim^{TD} 89

6 Forschungsprojekte zum automatisierten Fahren und zur autonomen Kolonnenfahrt 92
6.1 Automatisiertes Fahren 92
6.1.1 HAVEit 93
6.1.2 Hochautomatisierte Autobahnfahrt 94
6.1.3 Nothalteassistent 96
6.2 Autonome Kolonnenfahrt 97
6.2.1 KONVOI 97
6.2.2 SARTRE 98

Teil 2 – Umsetzung und Auswirkungen der autonomen Kolonnenfahrt auf Autobahnen 102

7 Anforderungen an die autonome Kolonnenfahrt 103
7.1 Definitionen 103
7.2 Gesetzliche Aspekte für die autonome Kolonnenfahrt 105

7.3 Technische Aspekte für die autonome Kolonnenfahrt 108

8 Systemübersicht und Zusammensetzung der autonomen Kolonnenfahrt 110

8.1 Systemübersicht 110

8.1.1 Systemkomponenten für die Kolonnenfahrt 110

8.1.2 Wirkkreis der Kolonnenfahrt 112

8.1.3 Systemsicherheit 113

8.2 Zusammensetzung autonomer Fahrzeugkolonnen 115

8.2.1 Definition der betrachteten Fahrzeugtypen 115

8.2.2 Festlegung der maximalen Kolonnenlänge 116

8.2.3 Betrachtung der Beschleunigungs- und Verzögerungsfähigkeit 117

8.2.4 Betrachtung homogener Kolonnen 123

8.2.5 Betrachtung inhomogener Kolonnen 128

8.2.6 Zusammenfassung zur Kolonnenzusammensetzung 129

9 Handlungsstrategien bei der autonomen Kolonnenfahrt 130

9.1 Interaktion innerhalb der Fahrzeugkolonne 131

9.1.1 Bilden einer Kolonne 131

9.1.2 Beitritt zu einer Kolonne 135

9.1.3 Anpassung einer Kolonne 144

9.1.4 Verlassen einer Kolonne 154

9.1.5 Auflösen einer Kolonne 157

9.2 Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern 161

9.2.1 Interaktion beim Überholen 162

9.2.2 Interaktion bei Hindernissen auf der Fahrbahn 165

9.2.3 Interaktion an Ein- und Ausfahrten 166

10 Auswirkungen der autonomen Kolonnenfahrt 169

10.1 Einfluss von Fahrzeugkolonnen auf den Verkehrsfluss 169

10.1.1 Theoretische Kapazitätsanalyse 169

10.1.2 Verkehrsfluss auf der freien Strecke 173

10.1.3 Verkehrsfluss im Bereich von Autobahneinfahrten 183

10.2 Einfluss von Fahrzeugkolonnen auf den Energiebedarf 190

© VuV 2013

10.2.1 Berechnung des Energiebedarfs 190
10.2.2 Auswertung des Energiebedarfs bei Kolonnenfahrt 196
10.3 Einfluss von Fahrzeugkolonnen auf die Verkehrssicherheit 198
10.4 Einfluss von Fahrzeugkolonnen auf die Wirtschaftlichkeit 199
10.5 Einfluss von Fahrzeugkolonnen auf den Fahrkomfort 201

Teil 3 – Zusammenfassung und Anlagen 203

11 Zusammenfassung und Ausblick 204

12 Verzeichnisse 207
12.1 Abbildungsverzeichnis 207
12.2 Tabellenverzeichnis 211
12.3 Literaturverzeichnis 211

13 Anlagen 219

Glossar

ABS Anti-Blockier-System, für bessere Fahrstabilität bei Bremsmanövern.

ACC (engl.) Adaptive Cruise Control, adaptive Geschwindigkeitsregelanlage zur Längsführung von Fahrzeugen in einem bestimmten Geschwindigkeitsbereich (Komfortsystem); auch als „Standard-ACC“ bezeichnet.

ADAS (engl.) Advanced Driver Assistance Systems, moderne komplexe Fahrerassistenzsysteme mit Umfelderfassung.

Ad-Hoc-Netzwerk Bezeichnung für ein unabhängiges, sich selbst organisierendes Netzwerk .

AFS (engl.) Active Front Steering, Überlagerungslenkung.

autonomes Fahren Definitionen nach BASt F83 (2012):

- Nicht automatisiert: Fahrzeugführung durch den Fahrer
- Assistiert: Fahrer übernimmt dauerhaft entweder die Quer- oder die Längsführung des Fahrzeugs, überwacht die vom System übernommene Aufgabe ständig und muss die gesamte Fahrzeugführung stets wieder übernehmen können
- Teilautomatisiert: Quer- und Längsführung durch das System, Fahrer überwacht das System dauerhaft und muss die Fahrzeugführung stets wieder übernehmen können
- Hochautomatisiert: Quer- und Längsführung durch das System, keine dauerhafte Überwachung durch den Fahrer notwendig und Übernahme der Fahrzeugführung erst mit ausreichender Zeitreserve
- Vollautomatisiert: vollständige Quer- und Längsführung durch das System, keine Überwachung durch den Fahrer notwendig und Übernahme der Fahrzeugführung erst mit ausreichender Zeitreserve; ohne Fahrerreaktion stellt das System selbstständig den risikominimalen Zustand her.

ASR Antriebs-Schlupf-Regelung, für bessere Fahrstabilität im Antriebsfall.

BAS Bremsassistent, baut bei einer Panikbremsung selbstständig den maximalen Bremsdruck auf (unter Berücksichtigung der ABS-Regelung).

C2CC (engl.) Car-to-Car-Communication, Kommunikation zwischen Fahrzeugen.

C2IC (engl.) Car-to-Infrastructure-Communication, Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktureinrichtungen.

C2XC (engl.) Car-to-X-Communication, allgemeine Bezeichnung für die Kommunikati-

	on von Fahrzeugen, beinhaltet C2CC und C2IC.
CAN	(engl.) Controller Area Network, serieller Datenbus zum Informationsaustausch in einem Steuergerätenetzwerk.
CbW	(engl.) Conduct-by-Wire, Bedienkonzept für Fahrerassistenzsysteme.
EHB	Elektrohydraulisches Bremssystem, Brake-by-Wire-System mit hydraulischer Rückfallebene.
EHPS	(engl.) Electro-hydraulic Power Steering, elektrohydraulische Lenkkraftunterstützung.
EPS	(engl.) Electric Power Steering, elektromechanische Hilfskraftlenkung.
ESC	(engl.) Electronic Stability Control, elektronische bremsbasierte Stabilitätskontrolle, die die ABS-, ASR sowie die Giermomentenregelung um die Fahrzeughochachse in einem System zusammenfasst. Weitere gängige Bezeichnungen bzw. Markennamen sind u.a. FDR, ESP.
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm, eingetragener Markenname der Daimler AG (siehe ESC).
FAS	Fahrerassistenzsystem.
FCW	(engl.) Forward Collision Warning, Frontalkollisions-Warnsystem.
FDR	Fahrdynamikregler, siehe ESC.
FSR-ACC	(engl.) Full-Speed-Range-ACC, Erweiterung des ACC-Geschwindigkeitsbereichs bis 0 km/h.
Fz	Fahrzeug/Fahrzeuge
GPS	(engl.) Global Positioning System; globales Navigationssatellitensystem.
H-Mode	(engl.) Horse-Mode, Bedienkonzept für Fahrerassistenzsysteme.
HAVEit	(engl.) Highly Automated Vehicles for Intelligent Transport, EU-gefördertes Projekt, das sich mit der Entwicklung von Konzepten und Technologien zum hochautomatisierten Fahren befasst.
HUD	(engl.) Head-up-Display, Blickfeldanzeige, Projektion wichtiger Informationen auf die Windschutzscheibe in den direkten Sichtbereich des Fahrers.
HMI	(engl.) Human-Machine-Interface, Mensch-Maschine-Schnittstelle.
IEEE	(engl.) Institute of Electrical and Electronics Engineers, bezeichnet einen Stan-

802.11 dard für drahtlose Netzwerke (WLAN)

HPS (engl.) Hydraulic Power Steering, hydraulische Lenkkraftunterstützung.

Kolonne In der vorliegenden Arbeit verwendete Kurzform für die betrachtete autonome Kolonne, Definitionen siehe Kapitel 7.1.

KONVOI Projekt zur Entwicklung und Untersuchung des Einsatzes von elektronisch gekoppelten Lkw-Konvois, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie BMWi

LCDAS (engl.) Lane Change Decision Aid System, Fahrstreifenwechselentscheidungsunterstützungssystem (umgangssprachlich auch Spurwechselunterstützung).

LDW (engl.) Lane Departure Warning, Fahrstreifenverlasswarnung.

LIDAR (engl.) Light Detection and Ranging, auf Laserpulsen basierendes Messprinzip, ähnlich Radar.

LKS (engl.) Lane-Keeping-Support, (aktive) Spurhalteassistenz.

Lkw Lastkraftwagen/Nutzfahrzeug (hier auch einschließlich Reisebusse etc.).

LSF-ACC (engl.) Low Speed Following ACC, Erweiterung des Standard-ACCs zur Staufolgefahrtunterstützung.

Pkw Personenkraftwagen.

Radar (engl.) Radio Detection and Ranging, auf elektromagnetischen Wellen (Funkwellen) basierendes Messprinzip.

RDS (engl.) Radio Data System, ermöglicht die Übermittlung von Zusatzinformationen beim Hörfunk.

SIM-Karte (engl.) Subscriber Identity Module (Teilnehmer-Identitätsmodul), Chipkarte zur Identifikation eines Nutzers im Mobilfunknetz.

sim^{TD} Sichere intelligente Mobilität Testfeld Deutschland, Forschungsprojekt zur Verifizierung der Car-to-X-Communication unter Realbedingungen

SARTRE (engl.) Safe Roadtrains for the Environment, Projekt zur autonomen Kolonnenfahrt, gefördert von der Europäischen Kommission.

Spur- umgangssprachliche Bezeichnung für Fahrstreifen (z.B. bei einem „Spurhaltesystem“); der Begriff wird in dieser Arbeit jedoch in Zusammenhang mit FAS benutzt, da dieser Begriff bspw. auch in Gesetzestexten Verwendung findet.

TMC (engl.) Traffic Message Channel, digitale Übertragung von Verkehrsbeeinträchtigungen im Rahmen des UKW-Signals, Informationen können bei der Routenwahl im Navigationssystem berücksichtigt werden.

TPEG (engl.) Transport Protocol Experts Group, Übertragung von Verkehrsinformationen auf digitalen Verbreitungswegen (DAB, DMB, DVB, Internet), Daten werden kodiert ausgesendet und können im Empfangsgerät in verschiedenen Formen ausgegeben werden.

VANET (engl.) Vehicular Ad-Hoc-Network, Ad-Hoc-Netzwerk für die Nachrichtenübermittlung zwischen Fahrzeugen sowie zwischen Fahrzeugen und Infrastruktureinrichtungen.

WLAN (engl.) Wireless Local Area Network, drahtloses lokales Netzwerk.

WÜ-StV Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr.

© VuV 2013

1 Einleitung

Die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen nimmt im Automobilsektor einen immer größeren Stellenwert ein. Fahrerassistenzsysteme sollen den Fahrer[1] bei seiner Fahraufgabe unterstützen und damit – je nach Entwicklungsziel – den Komfort steigern, die Sicherheit erhöhen oder auch den Kraftstoffverbrauch reduzieren. Mit fortschreitender Entwicklung werden diese Systeme mehr und mehr zu einem zusammenwirkenden, komplexen Gesamtsystem mit dem Fernziel des „autonomen Fahrzeugs" vernetzt. Dabei wird zwischen verschiedenen Funktionsstufen unterschieden, wobei diese von *teil-* über *hoch-* bis *vollautomatisiert* reichen (siehe auch „autonomes Fahren" im Glossar). Die Begriffe „autonomes Fahren" und „automatisiertes Fahren" werden in dieser Ausarbeitung gleichbedeutend verwendet, wobei hierunter in der Regel das hoch- bzw. vollautomatisierte Fahren zu verstehen ist.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit einem System zur „autonomen Kolonnenfahrt auf Autobahnen", bei dem Fahrzeuge elektronisch gekoppelt werden und mit möglichst kurzen Abständen einander folgen können. Dabei sollen die Folgefahrzeuge mindestens das hochautomatisierte Fahren beherrschen, während beim Führungsfahrzeug mindestens das assistierte, besser das teilautomatisierte, Fahren möglich sein muss. Ziel eines solchen Systems ist einerseits die Komfortsteigerung bei oft eintönigen Fahraufgaben, andererseits wird eine Steigerung der Verkehrssicherheit angestrebt. Durch die geringen Folgeabstände sowie ein möglichst konstantes Fahrverhalten sollen des Weiteren sowohl der Energiebedarf reduziert als auch der Verkehrsfluss verbessert werden.

Im ersten Teil dieser Ausarbeitung werden zunächst die Grundlagen in Form eines Überblicks zum Stand der Technik betrachtet. Dabei werden sowohl Fahrerassistenzsysteme zur Längs- und Querführung von Fahrzeugen als auch die u.a. für die „Kopplung" der Fahrzeuge wichtige Fahrzeugkommunikation behandelt. Der erste Abschnitt endet mit einer kurzen Vorstellung verschiedener Forschungsprojekte zum automatisierten Fahren und zur automatisierten Kolonnenfahrt.

Der zweite Abschnitt der Arbeit beginnt mit der Betrachtung der Anforderungen an die autonome Kolonnenfahrt, bevor ein Überblick über einen möglichen Systemaufbau gegeben wird. Des Weiteren werden verschiedene, die Kolonnenzusammensetzung betreffende Aspekte betrachtet. Anschließend werden für die Kolonnenfahrt relevante Handlungsstrategien vorgestellt. Dabei wird einerseits die Interaktionen zwischen den Kolonnenteilnehmern, anderseits aber auch die Interaktionen zwischen den Kolonnenteilnehmern und anderen, nicht gekoppelten Verkehrsteilnehmern betrachtet. Nach der Vorstellung von Möglichkeiten zur Umsetzung der autonomen Kolonnenfahrt

[1] In der vorliegenden Ausarbeitung wird i.d.R. die maskuline Form (z.B. „Fahrer") verwendet. Im Sinne des Gleichbehandlungsgesetzes sind diese Bezeichnungen als nicht geschlechtsspezifisch zu betrachten.

werden die Auswirkungen untersucht, wobei hier vor allem der Verkehrsfluss sowie der Energiebedarf und die Wirtschaftlichkeit im Vordergrund stehen.

Am Ende der Ausarbeitung werden im dritten Teil die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf die weitere Entwicklung bei der autonomen Kolonnenfahrt gegeben.

Die Umsetzung eines Systems zur autonomen Kolonnenfahrt stellt eine komplexe Thematik dar und war bereits Inhalt mehrerer Forschungsprojekte. Das Ziel dieser Ausarbeitung ist es daher, einen Überblick über die technischen Systeme und deren Zusammenwirken zu vermitteln. Des Weiteren sollen Möglichkeiten zur Umsetzung aufgezeigt sowie offene Arbeitspunkte und Herausforderungen in Bezug auf die Systembildung angesprochen werden. Im Rahmen dieser Arbeit können dabei nicht alle Aspekte berücksichtigt werden, es sollen jedoch die wichtigsten davon ausgeführt und Anstöße zu weiteren Überlegungen gegeben werden.

Teil 1

Stand der Technik

Fahrerassistenzsysteme

Sensorik für die Umfelderfassung

Informationserfassung für die Fahrzeugkommunikation

Fahrzeugkommunikation

Forschungsprojekte zum automatisierten Fahren und zur autonomen Kolonnenfahrt

2 Fahrerassistenzsysteme – Stand der Technik

Fahrerassistenzsysteme (FAS, engl. ADAS – Advanced Driver Assistance Systems) haben die Aufgabe, den Fahrer bei der Fahrzeugführung zu unterstützen bzw. zu entlasten (Reif, 2010b). Die Definition beinhaltet sowohl einfachere Systeme zur Informationsbereitstellung und Komfortsteigerung wie beispielsweise den Tachometer, die automatische Blinkerrückstellung oder den elektrischen Anlasser, als auch deutlich komplexere Systeme wie Fahrdynamikregelungen und adaptive Geschwindigkeitsregelungen (Winner et al., 2012).

Heute werden unter Fahrerassistenzsystemen vor allem Sicherheitssysteme zur Unfallvermeidung sowie Systeme zur Komfortsteigerung verstanden, beide mit dem Fernziel des autonomen Fahrens. Weiter wird zwischen aktiven Systemen mit Eingriffen in die Fahrzeugdynamik und passiven, d.h. den Fahrer informierende, Systeme unterschieden (Bosch, 2007). Die Einteilung von auf der elektronischen Fahrzeugrundumsicht basierenden Fahrerassistenzsystemen nach Bosch (2007) bzw. Reif (2010b) zeigt Abbildung 1. Assistenzsysteme können etwas allgemeiner auch in die Funktionsbereiche Stabilisierung, Bahnführung und Navigation eingeordnet werden (vgl. Winner et al., 2012). Im Hinblick auf die autonome Kolonnenfahrt werden im Folgenden Fahrerassistenzsysteme betrachtet, die den Fahrer bei der Bahnführung (Längs- und Querführung) des Fahrzeugs unterstützen bzw. die Fahrzeugführung (teilweise) übernehmen – und damit die technische Grundlage für die autonome Kolonnenfahrt bilden. Hierbei werden sowohl Sicherheits- als auch Komfortsysteme betrachtet. Es besteht jedoch nicht der Anspruch, auf alle auf dem Markt verfügbaren Assistenzsysteme einzugehen.

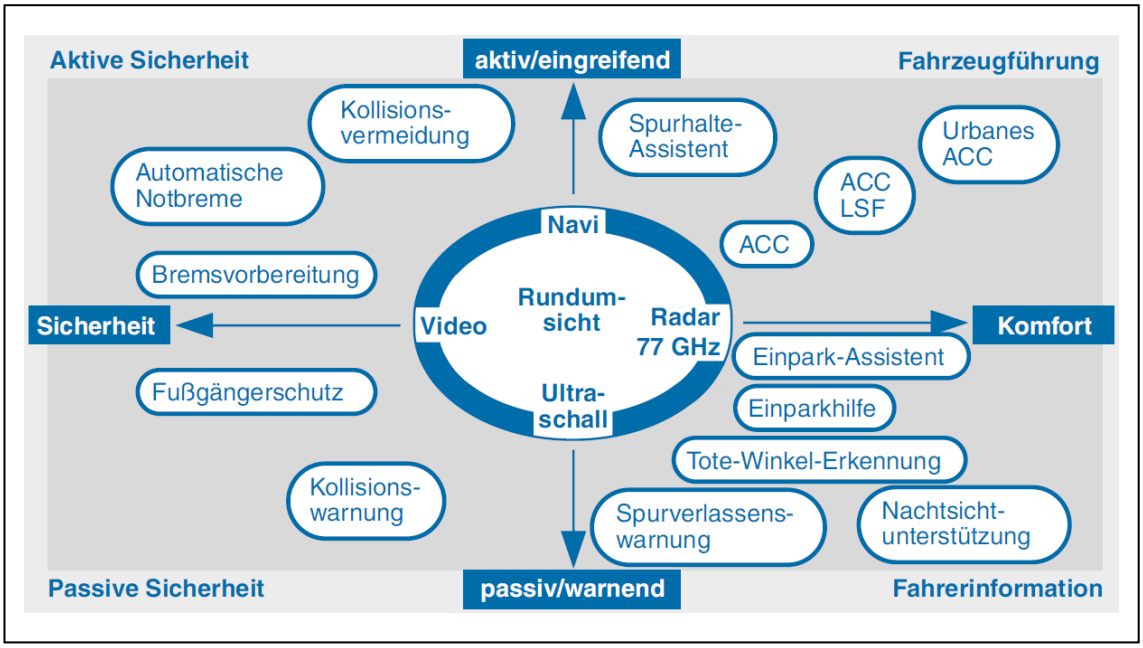


Abbildung 1: Sicherheits- und Komfortfunktionen auf der Basis der Fahrzeug-Umfelderfassung. (Reif, 2010b; S. 110)

2.1 Assistenzsysteme zur Längsführung von Fahrzeugen

Assistenzsysteme der Fahrzeuglängsführung beeinflussen über das Antriebs- und Bremssystem die Längsdynamik des Fahrzeugs und unterstützen den Fahrer bei der Verzögerung und Beschleunigung des Fahrzeugs sowie bei der Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit. Erstmals wurde der Bremskraftverstärker 1932 von der Marke Chrysler in Serie gebracht, der die notwendige Betätigungskraft des Fahrers verringert (Reif, 2010b) und ihn damit bei der Fahrzeugverzögerung unterstützt. 1958 wurde, ebenfalls von Chrysler, erstmalig eine Geschwindigkeitsregelanlage unter der Bezeichnung „Cruise Control“ angeboten (Viehmann, 2010). In Europa wurde die Geschwindigkeitsregelanlage 1962 unter dem in Deutschland gebräuchlichen Namen „Tempomat“ von Mercedes-Benz eingeführt (Viehmann, 2010). Moderne Systeme, wie z.B. diverse ACC-Entwicklungsstufen (ACC, engl. Adaptive Cruise Control, adaptive Geschwindigkeitsregelanlage bzw. Abstandsregeltempomat), können die Längsführung auch vollständig durchführen, der Fahrer ist jedoch nach wie vor für die Fahrzeugführung verantwortlich (Bosch, 2007). Systeme wie ACC haben ihren Ursprung in Forschungsprojekten wie dem europäischen Projekt PROMETHEUS (Programme for a European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety, 1986-1994), vgl. Winner et al. (2012) und Wiehen (2013), das vor allem die Entwicklung der Funktionalitäten und der Umfeldsensorik beeinflusste.

Statistiken zeigen, dass auf Autobahnen eine nicht an die Situationen angepasste Geschwindigkeitswahl sowie nicht ausreichende Folgeabstände zu den häufigsten Unfallursachen zählen (39,7% bzw. 28,0% aller Autobahnunfälle in Deutschland, nach ACE (2011)). Fahrerassistenzsysteme wie ACC zählen zwar zu den aktiven Komfortsystemen, haben jedoch auch Auswirkungen auf die Sicherheit und damit auch das Potenzial, die Zahl der Unfälle durch z.B. zu geringe Folgeabstände zu verringern. Im Folgenden werden die adaptive Geschwindigkeitsregelanlage (ACC) und deren verschiedene Funktions- und Entwicklungsstufen betrachtet. Anschließend wird auf verschiedene Bremssysteme eingegangen. Dabei gibt es bei den beiden genannten Systemgruppen Überschneidungen, was die Verwendung technischer Komponenten angeht.

2.1.1 Adaptive Geschwindigkeitsregelanlagen

2.1.1.1 Funktionen

ACC wird den aktiven Komfortassistenzsystemen zugeordnet (vgl. Abbildung 1 auf Seite 16). Die Grundfunktion von ACC entspricht einer normalen Geschwindigkeitsreglung (Abbildung 2, oberes Bild). Mittels Umfeldsensorik, i.d.R. Radar oder Lasermesstechnik (siehe Kapitel 2.1.2.2 bzw. 3), wird zusätzlich der Bereich vor dem Fahrzeug überwacht. Bei einem vorausfahrenden oder einscherenden Fahrzeug wird die Ge-

schwindigkeit entsprechend angepasst (Abbildung 2, mittleres Bild). Ist der Bereich vor dem Fahrzeug wieder frei, so wird wieder auf die vom Fahrer definierte Sollgeschwindigkeit eingeregelt (Abbildung 2, unteres Bild). ACC greift sowohl auf das Antriebssystem als auch auf das Bremssystem zurück, um die Wunschgeschwindigkeit bzw. einen vorgegebenen Abstand einzuregeln.

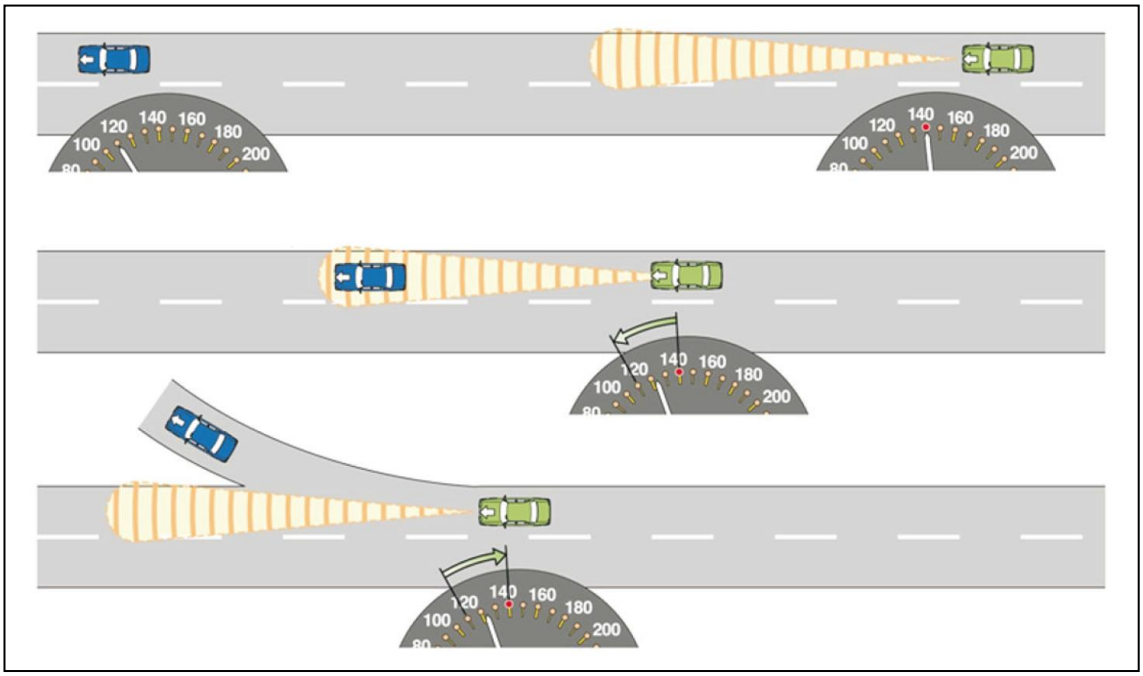


Abbildung 2: ACC-Funktion, Wechsel von Freifahrt zu Folgefahrt und zurück. (Winner et al., 2012; S. 478)

Für die ACC-Systeme („Standard-ACC“ bzw. nur als „ACC“ bezeichnet, sowie „Full-Speed-Range-ACC“ bzw. FSR-ACC), die im Folgenden betrachtet werden, stehen die Normen ISO 15622 (Transport information and control systems – Adaptve Cruise Control systems – Performance requirements and test procedures, 2002) sowie ISO 22179 (Intelligent transport systems – Full speed range adaptive cruise control (FSRA) systems – Performance requirements and test procedures, 2008) zur Verfügung (Winner et al., 2012). Wie bei Winner et al. (2012) zusammengefasst wird, ergeben sich nach ISO 15622 Anforderungen an ACC bzgl. *Freifahrt*, *Folgefahrt* und *Annäherung*. Die Freifahrt deckt die Regelung auf eine konstante Geschwindigkeit ab, sowie eine Geschwindigkeitsregelung mit Bremseingriff (z.B. bei verringerter Sollgeschwindigkeit oder bei Gefällfahrt).

Die Anforderungen an die Folgefahrt sind deutlich umfangreicher. Die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs muss aus Komfortgründen schwingungsgedämpft übernommen werden, außerdem soll die eingestellte Sollzeitlücke (siehe Kapitel 2.1.1.2) eingehalten werden. Wird der Abstand durch z.B. ein einscherendes Fahrzeug deutlich verkürzt, muss das System wie ein Fahrer reagieren und den Sollabstand durch „Zurückfallenlassen“ wieder herstellen. Des Weiteren muss das System in der

Lage sein, für ein zügiges Aufschließen bzw. Mitschwimmen im Verkehr hinreichend stark zu beschleunigen, sowie für die meisten Folgefahrten im fließenden Verkehr ausreichend stark zu verzögern. Bei schneller Annäherung an ein vorausfahrendes Fahrzeug muss außerdem ein vorhersehbarer Verzögerungsaufbau erreicht werden, damit der Fahrer besser einschätzen kann, ob wegen einer nicht ausreichenden ACC-Verzögerung eingegriffen werden muss.
Auch die Funktionsgrenzen sind in ISO 15622 definiert. Die minimale Sollgeschwindigkeit liegt oberhalb 7 m/s bzw. 30 km/h Tachogeschwindigkeit, bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten kleiner 5 m/s muss der Fahrer die Längsführung wieder übernehmen. Außerdem sind Grenzwerte für die Mindestzeitlücke sowie das Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsvermögen vorgegeben. Des Weiteren hat ein Fahrereingriff stets die oberste Priorität.

Zusätzlich zu den genannten Anforderungen stellt die Norm ISO 22179 für das FSR-ACC (Full-Speed-Range-ACC) weitere Anforderungen an die Folgefahrt und den Anhalte- bzw. Haltevorgang (vgl. ebenfalls Winner et al., 2012). Gegenüber dem Standard-ACC muss das FSR-ACC im gesamten Geschwindigkeitsbereich regeln können, d.h. ab bzw. bis 0 m/s. Hierbei ergeben sich vor allem an die Fahrt im Kriechbereich erhöhte Anforderungen an die Koordination von Antrieb und Bremse. Beim Anhalten muss ein sinnvoller Abstand eingehalten werden und ein sicheres Halten im Stand mit der entsprechenden Betriebsbremse möglich sein. Des Weiteren werden (Komfort-) Anforderungen an das Beschleunigungsvermögen und den Ruck in den verschiedenen Geschwindigkeitsbereichen gestellt.

ACC kann auch auf kurvigen Strecken eingesetzt werden, dabei sind diverse Punkte zu beachten, wie sie bei Reif (2010b) beschrieben werden. Die Längsbeschleunigung im Kurvenbereich darf nicht zu stark ausfallen, da das ACC als Komfortsystem ausgelegt ist. Bei zu schneller Kurvenfahrt muss ACC die Geschwindigkeit selbstständig verringern. Außerdem muss verhindert werden, dass bei Folgefahrt das ACC zu stark beschleunigt, wenn das vorausfahrende Fahrzeug z.B. in einer engen Kurve aus dem Erfassungsbereich des Umfeldsensors herausfährt – hier muss generell die mögliche Beschleunigung an die Sichtweite des Umfeldsensors angepasst werden. Details hierzu werden in Kapitel 2.1.1.2 erklärt.

2.1.1.2 Funktionsweise und Systemaufbau

Grundstruktur und Stellglieder

Die Grundstruktur und Komponenten eines ACC-Systems sind in Abbildung 3 zu sehen. ACC ist kein selbstständiges System, sondern vernetzt verschiedene Partnersysteme über das Steuergerätenetzwerk CAN (Controller Area Network). Zu den Partnersystemen gehören die Motor- und Getriebesteuerung, der Fahrdynamikregler (im Bild mit „ESP“ bezeichnet, siehe hierzu auch Abschnitt 2.1.2) sowie die in Abbildung 3 nicht

dargestellten Bedienelemente und das Kombiinstrument (Reif, 2010b). Auf die Abbildung wird im weiteren Verlauf nochmals eingegangen. Eine ausführlichere Beschreibung der einzelnen Stellsysteme und des Systemverbunds ist bei Winner et al. (2012) zu finden. Die vom Reglerverbund ermittelte Sollbeschleunigung wird an die unterlagerten Subsysteme „Antrieb“ und „Bremse“ übermittelt und dort in die notwendigen Antriebs- bzw. Bremsmomente umgesetzt, aus denen wiederum die Fahrzeugbeschleunigung resultiert. Die Funktionsweise wird im Folgenden nur grundlegend erklärt.

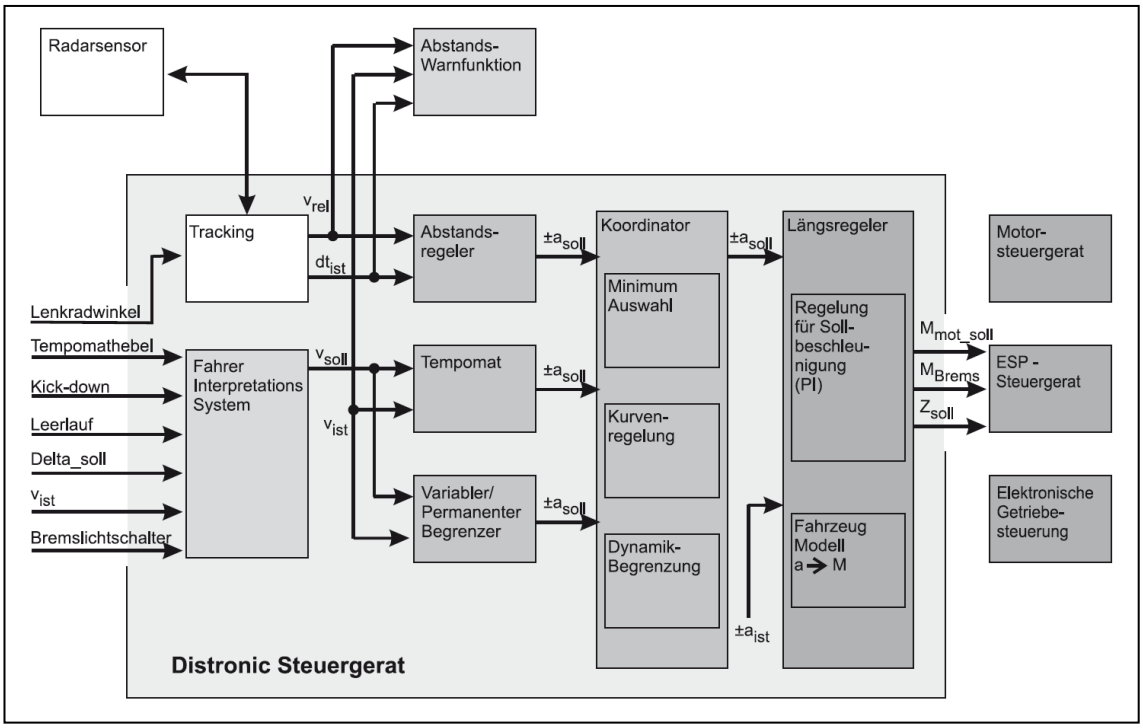


Abbildung 3: Grundstruktur und Komponenten der ACC-Regelung am Beispiel von Distronic (Mercedes-Benz). (Winner et al., 2012; S. 483)

Fahrzeuge ohne selbstständigen Bremskraftaufbau bzw. ohne Fahrdynamikregler nutzen lediglich das Motorschleppmoment zur Fahrzeugverzögerung, was jedoch nur zu geringen Verzögerungswerten führt. Seit der Einführung von Fahrdynamikregler (FDR) gibt es jedoch kaum noch ACC-Systeme ohne Bremseingriff. Das benötigte Bremsmoment zur Fahrzeugverzögerung wird an das ESP-Steuergerät (Abbildung 3) weitergegeben und dort umgesetzt. Aufgrund der Zielsetzungen bzgl. des Komforts werden an den Bremskraftaufbau und die Stelldynamik hohe Anforderungen gestellt, auf die hier jedoch nicht weiter eingegangen wird. Die technischen Voraussetzungen bzw. Umsetzungen zum Bremssystem werden im Abschnitt 2.1.2 betrachtet.

Wie bereits erwähnt, gibt ACC dem Antriebssubsystem lediglich die Sollbeschleunigung vor und überlässt diesem, wie die notwendigen Momente eingestellt werden. Es kann entweder das Motormoment angepasst werden oder, bei automatisierten Getrieben, die Getriebeübersetzung, siehe auch Abbildung 3. Dabei werden wie beim Bremskraftaufbau hohe Anforderungen an die Regelung gestellt, um alle relevanten

Fahrsituationen komfortabel abdecken zu können. Bei Fahrzeugen mit Handschaltgetrieben kann lediglich das Motormoment vorgegeben werden, der Fahrer erhält jedoch bei Bedarf Schalthinweise. Kommt der Fahrer diesen nicht nach, kann die Motorsteuerung die ACC-Funktion deaktivieren, um ein Abwürgen des Motors zu vermeiden.

Da die notwendigen Stellglieder (elektronisch geregeltes Antriebssystem sowie ein regelbares Bremssystem mit aktivem Bremskraftaufbau) i.d.R. in modernen Fahrzeugen vorhanden sind, hängt die ACC-Funktion von der Kenntnis des eigenen Bewegungszustands sowie der Bewegung des vorausfahrenden Fahrzeugs ab. Hierfür ist, wie bereits erwähnt, eine Umfeldsensorik notwendig. Die besonderen Anforderungen an die Umfeldsensorik für ACC-Systeme werden in diesem Abschnitt betrachtet, die Grundprinzipien der Umfeldsensorik werden in Kapitel 3 erklärt.

ACC-Regelung

Da die Umsetzung der vom ACC vorgegebenen Sollbeschleunigungen nun in ihren Grundzügen bekannt ist, stellt sich die Frage, wie das ACC-System die Sollbeschleunigung ermittelt. Die ACC-Regelung besteht aus insgesamt drei Regelmodulen, die für die in Abschnitt 2.1.1.1 beschriebenen Funktionen verantwortlich sind (Bosch, 2007): die Fahrgeschwindigkeitsregelung (Freifahrtregelung), die Folgeregelung (Abstandsregelung) sowie der die Regelung bei Kurvenfahrt, siehe auch Abbildung 3.

Wird von der Umfeldsensorik kein vorausfahrendes Fahrzeug erfasst, wird vom ACC die vom Fahrer eingestellte Sollgeschwindigkeit eingeregelt (Bosch, 2007). Bei einem von der Umfeldsensorik erkannten vorausfahrenden Fahrzeug wird zur Folgeregelung gewechselt. Dabei wird nicht der räumliche, sondern der zeitliche Abstand („Zeitlücke“) zum vorausfahrenden Fahrzeug geregelt (Bosch, 2007). Die Definition der Zeitlücke basiert auf der Überlegung, dass ein sich aus der Reaktionszeit ergebender Relativweg ausreichend ist, um eine Kollision mit dem vorausfahrenden Fahrzeug zu vermeiden. Dabei wird eine mindestens gleichwertige Verzögerungsfähigkeit vorausgesetzt (vgl. Winner et al., 2012). In der Regel kann der Fahrer den zeitlichen Folgeabstand zwischen einer und zwei Sekunden variieren (siehe auch Kapitel 2.1.1.3). Der räumliche Folgeabstand, der dem Fahrer angezeigt wird, ergibt sich dann aus der gewählten Zeitlücke und der aktuellen Geschwindigkeit.

Für die Folgeregelung müssen sowohl die Fahrzeugtrajektorien des ACC-Fahrzeugs sowie die des zu folgenden Fahrzeugs erfasst werden. Die Bewegung des ACC-Fahrzeugs wird über die bereits vorhandene Sensorik des Fahrdynamikreglers ermittelt. Hierzu gehören Raddrehzahlsensoren zur Ermittlung der Fahrzeuggeschwindigkeit sowie Querbeschleunigungs-, Gierraten- und Lenkradwinkelsensoren zur Ermittlung des querdynamischen Fahrzeugzustands z.B. bei Kurvenfahrt. Andere Fahrzeuge im für den ACC-relevanten Bereich vor dem Fahrzeug werden über die Umfeldsensorik erfasst. Bei der Regelung für die Kurvenfahrt wird wie bei der Folgeregelung grundsätzlich die Zeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug geregelt. Zusätzlich werden noch die in Abschnitt 2.1.1.1 vorgestellten Funktionen bei Kurvenfahrt umgesetzt.

Umfelderfassung, Objektauswahl und Tracking

Wie bei den bisherigen Beschreibungen deutlich wird, stellen die Umfeldsensorik und die dazugehörige Regelungen den Kern des ACC-Systems dar. Die Umfeldsensorik und die integrierte Elektronik muss Objekte vor dem Fahrzeug erkennen und einem Fahrstreifen zuordnen können (Bosch, 2007). Zur Umfelderfassung wird bei ACC i.d.R. auf verschiedene Radartechnologien zurückgegriffen, es sind jedoch auch Systeme umgesetzt, die Lasermesstechniken verwenden (LIDAR), siehe Kapitel 3.3. Die Umfeldsensorik ist in der Fahrzeugfront untergebracht und ist parallel zur Fahrzeuglängsachse ausgerichtet (Bosch, 2007). Die Erfassungs- und Auswerteeinheit können entweder räumlich getrennt angeordnet (vgl. Abbildung 3, Seite 20) oder in einer Einheit untergebracht sein (ACC-SCU, engl. Sensor & Control Unit, Sensor- und Steuereinheit; vgl. Winner et al. (2012)). Die folgenden Beschreibungen in diesem Abschnitt beziehen sich auf die Erklärungen von Reif (2010b), falls nicht anderweitig gekennzeichnet.

Für das Standard-ACC wird i.d.R. ein Long-Range-Radarsensor (siehe Kapitel 3.2) verwendet, der auf einen Erfassungsbereich von ca. 10 bis 200 m ausgelegt ist. Die ausgesendeten Signale werden durch etwaige Objekte im Erfassungsbereich reflektiert und im Sensor empfangen. Die reflektierten Strahlen haben dabei einen charakteristischen Frequenzanteil, der sich aus dem Abstand und der Relativgeschwindigkeit des erfassten Objekts ergibt. Die Signalamplituden sind abhängig von den Reflexionseigenschaften des Objekts. Vor der weiteren Auswertung muss das analog empfangene Signal in ein digitales Signal gewandelt werden (A/D-Wandlung), u.a. mittels Spektral- (Fast Fourier Transformation, FFT) und Rauschanalyse. Anschließend können dann Abstand und Relativgeschwindigkeit des Objekts bestimmt werden.

Beim sogenannten Tracking (siehe auch Abbildung 3, Seite 20) wird ein erfasstes Zielobjekt weiter verfolgt. Dies wird einerseits durchgeführt, um Informationen über die Bewegung des verfolgten Objekts zu erhalten, andererseits um Auswirkungen zufälliger Messfehler verringern zu können (Winner et al., 2012). Dabei werden die aktuellen Messdaten des detektierten Objekts mit denen der vorherigen Messung verglichen. Anhand des Abstands und der Relativgeschwindigkeit der letzten Messung, wird der erwartete Abstand zum Zeitpunkt der nächsten Messung berechnet. Da das zu verfolgende Objekt ebenfalls beschleunigen oder verzögern kann, wird ein Unsicherheitsbereich zum prognostizierten Abstand betrachtet, in dem das Objekt zum nächsten Messzeitpunkt erwartet wird.

Die einzelnen Schritte zur Ziel- bzw. Objektauswahl sind in Abbildung 4 dargestellt. Die Zielauswahl ist für die Qualität des ACCs von großer Bedeutung, da nicht erfasste oder falsch ausgewählte Objekte einen Eingriff des Fahrers notwendig machen (Winner et al., 2012). Im ersten Schritt wird die laterale Lage (Abbildung 4 rechts, Größe y_u) des potentiellen Zielfahrzeugs zum berechneten Kurs des eigenen Fahrzeugs bestimmt (Größe y_c). Der eigene Kurs wird über einen quadratischen Ansatz als Kreisbogennäherung bestimmt. Die Größe κ beschreibt die Krümmung der Richtungsänderung des

eigenen Fahrzeugs (Kehrwert des Kurvenradius) und kann aus dem Lenkradwinkel, der Gierrate, der Querbeschleunigung oder aus den Differenzen der Radgeschwindigkeiten ermittelt werden. Bei der Zuordnung des erfassten Objekts zum Fahrkorridor wird die Wahrscheinlichkeit berechnet, mit der sich das Objekt auf der eigenen Spur befindet (Spurwahrscheinlichkeit). Mit diesen Eingangsgrößen wird die Plausibilität eines Objekts ermittelt, die als Kennzahl die Relevanz des Objekts festlegt. Das Objekt wird in der Zielauswahl übernommen, wenn eine gewisse Mindestplausibilität erreicht ist. Bei den aktuell verfügbaren ACC-Systemen werden nur bewegte Objekte der eigenen Fahrtrichtung berücksichtigt. Hinsichtlich FSR-ACC-Systemen ist noch anzumerken, dass zusätzliche Radarsensoren für den Nahbereich benötigt werden (siehe auch Kapitel 3.2).

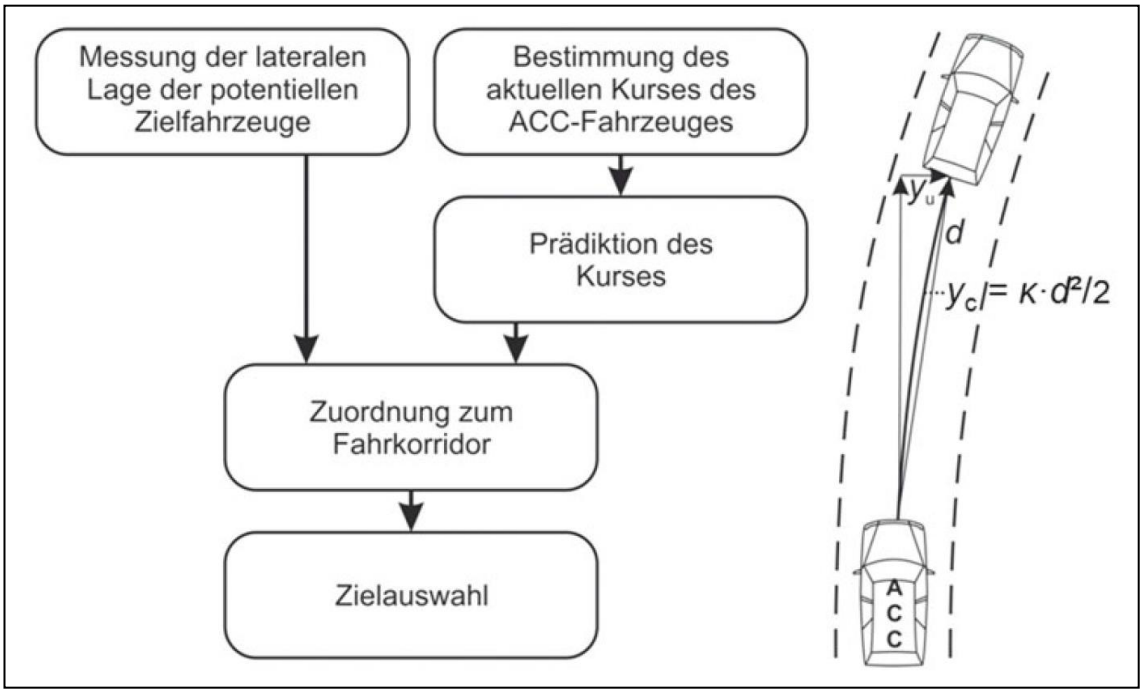


Abbildung 4: Schritte zur Zielauswahl und geometrische Größen (rechts). (Winner et al., 2012; S. 496)

Systemgrenzen

Aufgrund der technischen/physikalischen Grenzen der verwendeten Umfeldsensorik bzgl. der Objektklassifizierung werden stehende Objekte im Standard-ACC aus Sicherheitsgründen nicht berücksichtigt (z.B. stehende Fahrzeuge oder Getränkedosen auf der Fahrbahn), da ACC auf z.B. am Fahrbahnrand stehende Fahrzeuge in unerwünschter Weise mit einer Verzögerung reagieren könnte. Bereits erfasste Fahrzeuge, die bei der Objektverfolgung verzögern und zum Stehen kommen, können jedoch zuverlässig erfasst und berücksichtigt werden. Mit den Weiterentwicklungen der Umfeldsensorik, z.B. auch durch Datenfusion, und der damit einhergehenden Verbesserung in der Objekterkennung wird es zukünftig auch möglich sein, zuverlässig auf stehende Objekte zu reagieren (vgl. Abschnitt 2.1.2 bzw. Kapitel 3.5).

Die Methoden zur Zielauswahl haben laut Winner et al. (2012) ein sehr hohes Qualitätsniveau erreicht, stoßen jedoch in verschiedenen Situationen an ihre Grenzen. Ein Beispiel ist das bei Winner et al. (2012) beschriebene „Überholdilemma“, bei dem man sich deutlich langsamer vorausfahrenden Fahrzeugen nähert. Da eine Abbremsung komfortabel ausfallen sollte, müsste bereits früh mit der Verzögerung begonnen werden. Andererseits ist es wahrscheinlich, dass bei großen Differenzgeschwindigkeiten das langsamere Fahrzeug überholt werden soll. Es besteht also ein Konflikt zwischen einer zu frühen Systemreaktion, wenn das langsamere Fahrzeug überholt werden soll, und einer zu späten Reaktion, wenn ein Überholvorgang nicht gewollt oder nicht möglich ist. Eine weitere Schwierigkeit stellen Ein-/Ausschervorgänge dar. Durch Interpretation z.B. des Fahrtrichtungsanzeigers könnten diese Situationen besser klassifiziert werden – es besteht dabei jedoch stets ein Konflikt mit der Transparenz dieser zusätzlichen Funktionen (siehe auch Kapitel 2.1.1.3).

Besonderheiten bei ACC-Systemen für Nutzfahrzeuge

Die Grundprinzipien bei ACC-Systemen für Nutzfahrzeuge entsprechend denen bei Pkw, es sind jedoch teilweise Anpassungen notwendig, da z.B. die fahrdynamischen Grenzen anders gesetzt werden müssen. Des Weiteren kann beim Bremssystem auch auf Dauerbremsen zurückgegriffen werden, was in der Ansteuerung entsprechend zu berücksichtigen ist. Auch das bei Lkw deutlich häufiger auftretende Kolonnenfahren muss in der ACC-Auslegung berücksichtigt werden. ACC ist ab dem 01.11.2013 für alle in der EU neu zugelassenen Lkw-Modelle Pflichtausstattung (EG Verordnung 661/2009, vgl. ADAC 2010).

ACC für die autonome Kolonnenfahrt

Die vorgestellten FSR-ACC-Systeme sind bereits vollständig für die autonome Längsführung in einer Kolonne einsetzbar, wobei das Bremssystem selbstständig die maximale Bremskraft aufbringen können muss (vgl. Kapitel 2.1.2). Die Anforderungen eines FSR-ACC an die Qualität der Umfelderfassung vor dem Fahrzeug sind sehr hoch. Für die autonome Kolonnenfahrt mit geringen Folgeabständen wären diese wesentlich geringer, da rein theoretisch ein deutlich kleinerer Bereich vor dem Fahrzeug überwacht werden müsste. Dadurch wäre eine Umfeldsensorik mit einem geringeren Funktionsumfang verwendbar, was die Systeme wiederum auch für Fahrzeuge der Kompaktklasse preislich interessant machen würde.

2.1.1.3 Bedienung und Sicherheitskonzepte

Die Bedienung von ACC-Systemen sowie die Visualisierung der Informationen sollten möglichst einfach gestaltet sein, um den Fahrer nicht zu stark zu fordern. Jeder Hersteller setzt dabei i.d.R. eigene Bedienkonzepte um. Für ACC werden häufig Lenkstockhebel oder Lenkradtasten verwendet. Die Informationen der ACC für den Fahrer

werden im Kombiinstrument und/oder über Head-Up-Displays in der Windschutzscheibe aufbereitet dargestellt. Hierzu gehören i.d.R. die aktuelle sowie die eingestellte Fahrzeuggeschwindigkeit, die Sollzeitlücke bzw. der Folgeabstand und Informationen über erkannte Zielobjekte.

Bezüglich der Sicherheitskonzepte ist an erster Stelle zu erwähnen, dass der Fahrer stets die Verantwortung für die Fahrzeugführung hat (vgl. Kapitel 7.2). Es muss also sichergestellt werden, dass der Fahrer jederzeit das ACC z.B. durch eine Betätigung des Bremspedals übersteuern kann. Des Weiteren wird vom ACC ein Fail-Safe-Verhalten gefordert, d.h. dass bei erkannten Fehlern der Sensor deaktiviert und die Aktuatoren (Antriebs- und Bremssubsysteme) nicht mit Sollwerten beaufschlagt werden dürfen (vgl. Reif, 2010b). Da es sich beim ACC um ein sicherheitsrelevantes System handelt, ist eine Überwachung durch Diversität und Redundanz umgesetzt, es erfolgt also auch eine gegenseitige Kontrolle zwischen den verschiedenen Steuergeräten.

2.1.1.4 Ausblick

Aktuell sind erste FSR-ACC-Systeme mit erweitertem Funktionsbereich bzgl. dem „Staufolgefahren“ am Markt erhältlich (LSF-ACC, Low Speed Following; vgl. Reif 2010b). Hier ist auch die Erkennung von stehenden Objekten verbessert. In Verbindung mit einer erweiterten (kamerabasierten) Erfassung der Fahrzeugumgebung ist auch ein teilautomatisiertes Staufolgefahren möglich (vgl. Abschnitt 2.3). Die ACC-Funktionen bilden alles in allem also auch ein Grundgerüst für autonome Fahrzeuge (Kapitel 6) sowie für die autonome Kolonnenfahrt, die ab Kapitel 7 betrachtet wird.

2.1.2 Bremssysteme

Die bekanntesten Fahrerassistenzsysteme, die die Radbremsen als Stellglieder verwenden, stellen ABS (Antiblockiersystem), ASR (Antriebsschlupfregelung) sowie der Fahrdynamikregler ESC (engl. Eletronic Stability Control, Elektronische Stabilitätskontrolle) dar. Letzterer ist vor allem in Deutschland unter dem gängigeren Namen „ESP“ (eingetragenes Warenzeichen der Daimler AG) bekannt. ABS, ASR und ESC sind Fahrstabilisierungssysteme und dienen damit der aktiven Sicherheit. ESC regelt die Fahrzeugdynamik in Längs- und Querrichtung sowie die Drehbewegung des Fahrzeugs um dessen Hochachse (Gierbewegung). Die Systeme ASR und ESC können den Bremsdruck über (elektro-)hydraulische Aggregate selbstständig radindividuell aufbauen und bilden daher die technische Basis für zahlreiche weitere Bremsassistenzfunktionen, die als Erweiterung bzw. Ergänzung der adaptiven Geschwindigkeitsregelung angesehen werden können. Der Fahrdynamikregler ist dabei den anderen

Erweiterungssystemen i.d.R. überlagert und steuert die Stellglieder (Radbremsen, aber auch Motor- und Getriebesteuerung) an.

Bei Reif (2010b) wird eine Unfallstudie in Deutschland aufgeführt (GIDAS, German In-Depth Accident Study), die zu dem Ergebnis kam, dass nur bei 1 % der betrachteten Unfälle tatsächlich eine Vollbremsung mit -8 bis -10 m/s^2 durchgeführt wird. Zu 45% erfolgen Teilbremsungen mit Verzögerungswerten von -2 bis -8 m/s^2. Bei den restlichen 54 % wird nur mäßig oder gar nicht verzögert (< -2 m/s^2). Dies zeigt, dass vor allem fehlende Aufmerksamkeit häufige Ursache für Auffahrunfälle ist.

Ab dem 31. Oktober 2014 gilt für alle EU-Neufahrzeuge eine grundsätzliche ESC-Ausrüstungspflicht (Bosch, 2011). Ab dem 01.11.2013 gilt zudem für bestimmte in der EU neu zugelassene Nutzfahrzeuge eine Ausstattungspflicht mit automatischen Notbrems-Assistenzsystemen in Verbindung mit ACC (EG-Verordnung Nr. 347, 2012). Als Notbrems-Assistenzsystem wird dabei ein System definiert, „das eine Gefahrensituation selbstständig erkennt und das Abbremsen des Fahrzeugs veranlassen kann, um einen Zusammenstoß zu verhindern oder abzumildern“ (EG-Verordnung Nr. 661 (2009); S. 8).

Im Folgenden soll ein Überblick über die Warnsysteme bis hin zu den eben erwähnten Notbremssystemen gegeben werden. Diese Systeme werden z.B. bei Winner et al. (2012) unter dem Begriff Frontalkollisionsschutzsysteme zusammengefasst. Bremssysteme, die selbstständig die vollständige Bremskraft aufbauen können, sind für die autonome Kolonnenfahrt zwingend notwendig und bilden mit dem ACC-System das technische Grundgerüst für die automatische Längsführung innerhalb der Kolonnen.

2.1.2.1 Bremssysteme und Entwicklungsstufen

Bremsassistent BAS

Wie anhand der einleitend genannten GIDA-Studie klar wird, spielt einerseits die Unaufmerksamkeit der Fahrer eine wichtige Rolle bei Auffahrunfällen, andererseits eine nicht ausreichende Verzögerung. Bei letzteren, auch als „Teilbremsung“ bezeichneten Verzögerungen, reagieren die Fahrer zwar meist schnell genug, jedoch nicht mit der letzten Konsequenz, wie es in Abbildung 5 exemplarisch dargestellt wird.

Dieses Verhalten hat einen längeren Bremsweg zur Folge, dem der Bremsassistent (BAS) entgegenwirken soll. Hierzu wird die Betätigungsgeschwindigkeit des Bremspedals überwacht und beim Überschreiten einer empirisch ermittelten Schaltschwelle schnellstmöglich der maximale Bremsdruck durch den BAS aufgebaut (Winner et al., 2012). Der Fahrdynamikregler bzw. das ABS sind dabei nach wie vor aktiv und regeln den vom BAS aufgebauten Bremsdruck. Der Bremsdruck wird durch den BAS so lange aufrechterhalten, wie der Fahrer das Bremspedal betätigt. Sobald dieser das Brems-

pedal „zurücknimmt“, schaltet auch der BAS wieder ab. Auf die technische Umsetzung des BAS wird in Kapitel 2.1.2.2 eingegangen.

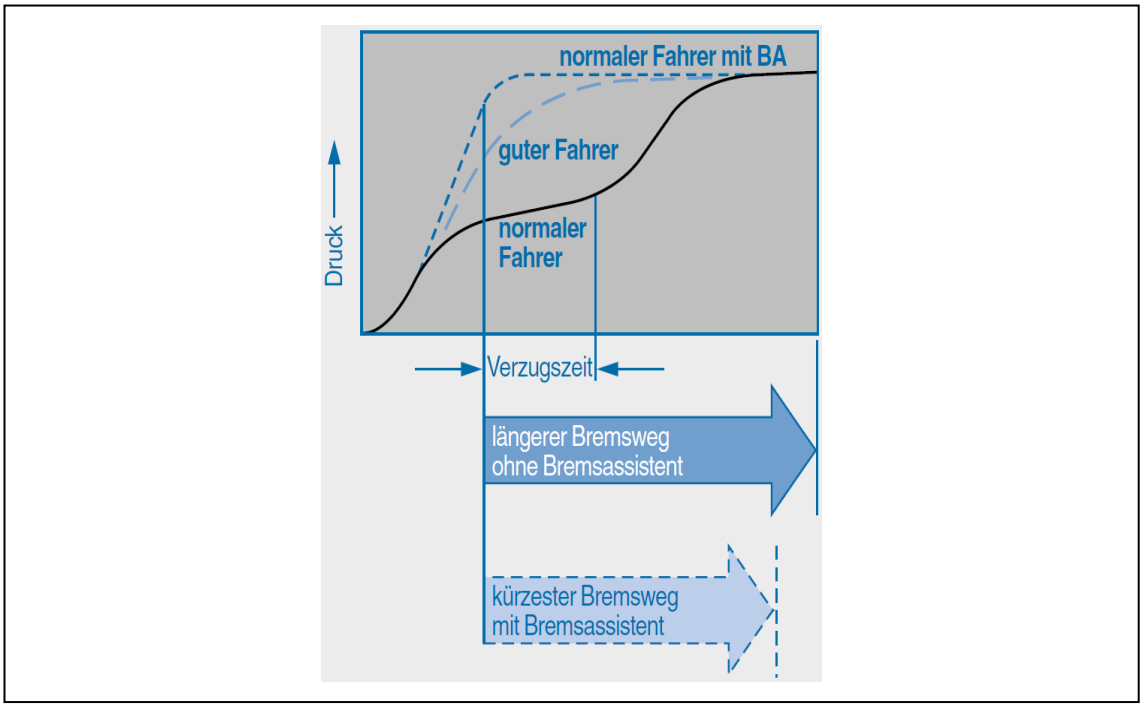


Abbildung 5: Bremsungen mit und ohne Bremsassistent (BA). (Reif, 2012; S. 78)

Bei vorhandener Umfeldsensorik bzw. Situationserkennung kann der Unterstützungsgrad des BAS vom noch verfügbaren Abstand zum erkannten Hindernis ausgelegt werden, wie bei Winner et al. (2012) beschrieben wird. Dabei wird abhängig von der Ausgangsdifferenzgeschwindigkeit und dem Abstand zum Zielobjekt die notwendige Verzögerung ermittelt und eingestellt, um gleichmäßig zu verzögern. Dies ist dann hilfreich, „wenn der Fahrer die Situation unkritischer einschätzt, als sie tatsächlich ist, sowie unangemessen gering bremst und somit wiederum die Reserve für den rechtzeitigen Geschwindigkeitsabbau verkleinert“ (Winner et al. (2012); S. 527).

Der BAS kann jedoch nur wirken, wenn der Fahrer in einer kritischen Situation auch das Bremspedal betätigt, andernfalls ist der BAS wirkungslos. Auf diesen Aspekt wird im Folgenden bei den Frontalkollisionsschutzsystemen nochmals eingegangen.

Frontalkollisionsschutzsysteme

Die Frontalkollisionsschutzsysteme (z.B. FCW, engl. Forward Collision Warning) sind sogenannte prädiktive, d.h. vorausschauende, Systeme und stellen einen wichtigen Schritt auf dem Weg zum Fernziel der aktiven Unfallvermeidung dar. Wie bereits mehrfach erwähnt, geht vielen Unfällen Unaufmerksamkeit voraus, es wird zu spät, nicht mit der notwendigen Konsequenz und/oder falsch reagiert. Auf diesen Punkten bauen die prädiktiven Assistenzsysteme auf (Reif, 2010b). Bei Winner et al. (2012) wird eine dreistufige Strategie aufgeführt: *präventive Assistenz*, *Reaktionsunterstützung* sowie *Not-*

manöver. Eine ähnliche Einteilung ist bei Reif (2010b) zu finden, nachfolgende Beschreibungen beziehen sich jedoch auf die Einteilung bei Winner et al. (2012), falls nicht anderweitig vermerkt.

Durch die *präventive Assistenz* kann die Verfassung des Fahrers durch Komfortsysteme wie z.B. ACC verbessert werden. Dies ist vor allem auf physiologische als auch psychologische Wirkungen zurückzuführen. Wie bereits erwähnt, wird durch ACC auch oft eine größere Zeitlücke eingehalten. Es ist jedoch nach wie vor nicht nachgewiesen, ob das Vertrauen auf ACC zu einer längeren Reaktionszeit des Fahrers führt, oder ob durch die frühe Verzögerung durch das ACC-System die Aufmerksamkeit erhöht wird.

Beim zweiten Bestandteil der Strategie, der *Reaktionsunterstützung*, soll bei entsprechend erfassten Situationen zuerst die Aufmerksamkeit des Fahrers erregt, ihm die Situation dann erklärt und er anschließend unterstützt werden. Die Warnungen können dabei entweder akustisch über Warntöne, optisch über Informationen im Kombiinstrument/Head-up-Display (HUD) oder haptisch, z.B. durch einen Bremsruck oder ein eingeprägtes Lenkmoment, erfolgen. Kombinationen sind ebenfalls möglich bzw. sogar sinnvoll. Die Warnsysteme werden auch unter dem Fachbegriff Collision Warning geführt. Für Beschreibungen zur zeitlichen Abfolge der Warnsysteme sowie zur Ausführung der Warnung wird auf die verwendete Literatur verwiesen.

Folgt auf die genannten Warnstufen keine Reaktion des Fahrers (Ausweichen oder Bremsen), so kommt die *Notmanöver*-Strategie zum Einsatz. Damit soll kurz vor dem prognostizierten Unfall dieser nach Möglichkeit noch aktiv verhindert bzw. dessen Folgen minimiert werden (sog. Collision Mitigation Systeme). Generell kann der Fahrer bei kritischen Situationen im Längsverkehr entweder dem Hindernis Ausweichen oder vor diesem Anhalten. Bei Ausweichvorgängen könnte die Situation durch autonome Lenkimpulse entschärft werden, wenn dabei weitere Folgeunfälle (z.B. Frontalzusammenstoß mit dem Gegenverkehr) ausgeschlossen werden können. Eine Umsetzung scheitert bisher jedoch an der notwendigen Umfeldsensorik. Im Gegensatz dazu sind autonome Notbremssysteme bereits verfügbar, wobei diese aufgrund der aktuellen Gesetzgebung (vgl. Kapitel 7.2) erst dann eingreifen, wenn ein Ausweichmanöver nicht mehr erwartet werden kann. Die Systeme haben dabei entweder einen schwach oder stark ausgeprägten Bremseingriff (mit 30-40 % der maximalen Verzögerung (Speed Reduction Braking, SRB) bzw. > 50 % der maximalen Verzögerung).

Die genannten Systeme arbeiten dabei i.d.R. in Verbindung mit der passiven Sicherheitssystemen und -techniken zusammen und bereiten die Insassenschutzsysteme auf einen möglichen Unfall vor (z.B. reversible Gurtstraffung für eine optimale Insassenrückhaltung). Als Beispiel kann hier auf das „Pre-Safe“-System von Mercedes-Benz verwiesen werden.

Notbremssysteme für Nutzfahrzeuge

Die Bremsassistenzsysteme für Nutzfahrzeuge funktionieren grundsätzlich nach den gleichen Prinzipien wie die bereits beschriebenen Systeme. Lediglich die technische Umsetzung des selbstständigen Bremskraftaufbaus kann bei Nutzfahrzeugen unterschiedlich ausfallen (hydraulisch vs. pneumatisch). An dieser Stelle sei jedoch nochmals erwähnt, dass für Nutzfahrzeuge in der EU ab November 2013 die Ausstattungspflicht mit Notbremssystemen beginnt. Ein hierfür bereits verfügbares System ist z.B. der „Active Brake Assist 3“ von Mercedes-Benz, der bei Geschwindigkeiten bis 60 km/h selbstständige Vollbremsungen auch bei stehenden Objekten einleiten kann (Daimler AG, 2013a).

2.1.2.2 Systemkomponenten und Systemaufbau

Die im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Bremssysteme müssen alle in der Lage sein, ohne die Fußkraft des Fahrers Bremsdruck aufbauen zu können. Diese Anforderung trifft auf alle modernen Bremssysteme zu. Die hierfür notwendige Hilfsenergie wird je nach Bremssystem über einen vorgeladenen Hochdruckspeicher, über (elektrische) Hydraulikpumpen oder über pneumatische Systeme (hauptsächlich bei Nutzfahrzeugen) zur Verfügung gestellt und wird in den entsprechenden Abschnitten kurz beschrieben.

Den prinzipiellen Systemaufbau, unabhängig von der Art der Hilfsenergiequelle, zeigt Abbildung 6. Das ESC-Steuergerät (in der Abbildung mit ESP bezeichnet) ist der übergeordnete Regler, der diverse Zusatzfunktionen enthalten kann. Abhängig von der Betätigungskraft am Bremspedal und/oder den angeforderten Verzögerungswerten durch z.B. ACC, werden die notwendigen Radbremsmomente ermittelt und schließlich an den Aktuator weitergegeben.

Die allgemeine Wirkungskette für Bremssysteme bei Pkw ist in Abbildung 7 dargestellt. Der Fahrer betätigt das Bremspedal (HMI, engl. Human-Machine Interface, Mensch-Maschine-Schnittstelle) mit dem Fuß und prägt damit seinen Verzögerungswunsch in das Bremssystem ein, je nach Bremssystem ergeben sich verschiedene Wirkungspfade. Der rein mechanische Übertragungsweg von der Mensch-Maschine-Schnittstelle über Gestänge oder Seilzüge spielt dabei in Pkw praktisch keine Rolle. Der Modulator, z.B. eine regelbare zweikreisige Hydraulikpumpe, wird vom Fahrdynamikregler angesteuert und regelt den Bremsdruck (z.B. ABS-Eingriff bei Bremsvorgängen). Die wichtigsten verschiedenen Bremssysteme sowie deren Wirkpfade werden im Folgenden kurz vorgestellt.

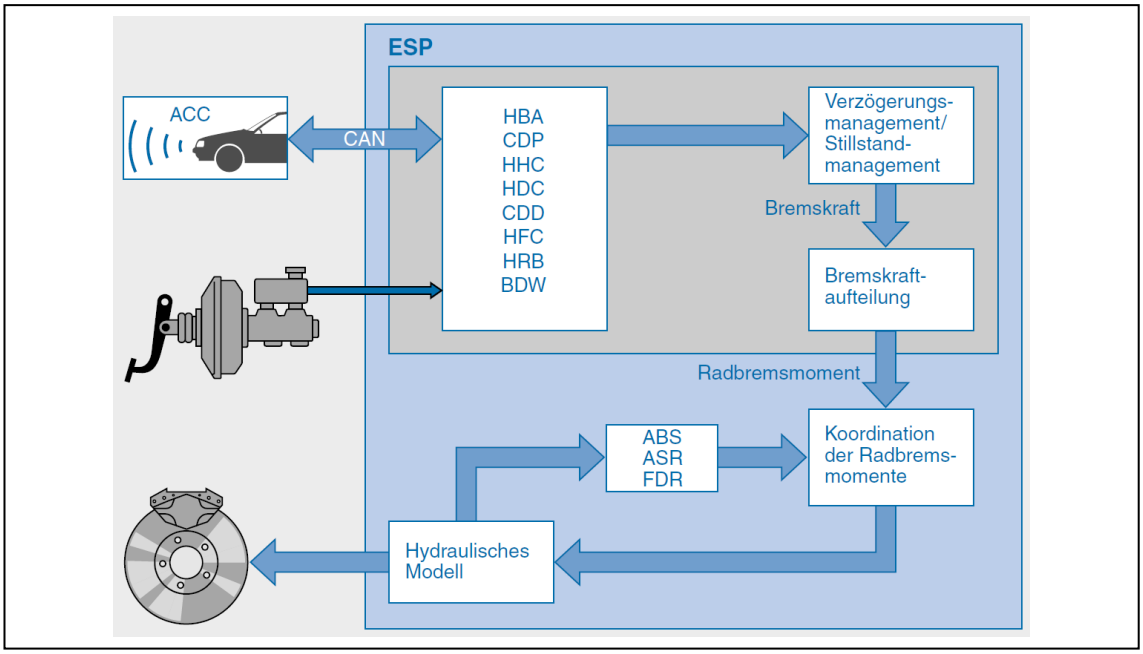


Abbildung 6: Blockdiagramm für ein Bremssystem. (Reif, 2010b; S. 74)

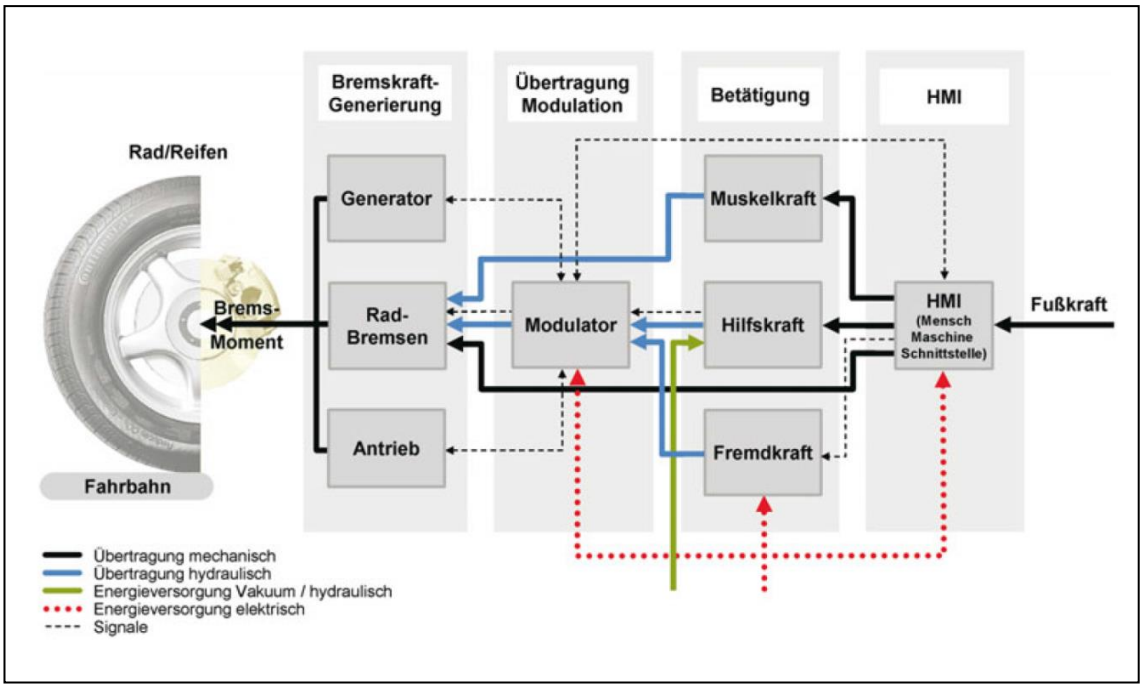


Abbildung 7: Wirkketten in Pkw-Bremssystemen. (Winner et al., 2012; S. 250)

Hydraulische Bremssysteme

Das hydraulische Bremssystem ist in Pkw sehr weit verbreitet. Als Übertragungsmedium kommt eine spezielle Hydraulikflüssigkeit zum Einsatz, die als praktisch inkompressibel betrachtet werden kann. Die vom Fahrer aufgebrachte mechanische Betätigungsenergie in Form von Kraft und Weg wird in hydraulische Energie (Druck und Volumen) umgewandelt und zusätzlich durch eine Fremdenergie verstärkt (Winner et al.,

2012). Die Hilfskraft, vgl. Abbildung 7, wird durch einen sogenannten Bremskraftverstärker erzeugt. Im Normalfall kommen hier Vakuum-Bremskraftverstärker zum Einsatz, wobei das Vakuum vom Ansaugtrakt des Ottomotors erzeugt wird bzw. durch eine Vakuumpumpe bei Dieselmotoren. Die verstärkte Pedalkraft bzw. der verstärkte Bremsdruck wird dann weiter in den Modulator (HCU, Hydraulic Control Unit) übertragen, der wiederum durch eine Fremdenergie versorgt wird. Vom Modulator wird der Bremsdruck dann an die einzelnen Radbremsen verteilt, wo die kinetische Energie des Fahrzeugs schließlich in Reibenergie (Wärme) gewandelt wird.

Die Fremdkraftquelle, z.B. eine elektrisch betriebene Hydraulikpumpe des Fahrdynamikreglers, kann über den Modulator selbstständig und unabhängig von einer vorhandenen Betätigungskraft durch den Fahrer die Radbremsen betätigen. Mit diesem System können also bereits die vorgestellten Bremsassistenzfunktionen umgesetzt werden.

Die hydraulischen Bremssysteme werden, gesetzlich vorgeschrieben, zweikreisig ausgelegt. Dies bedeutet, dass das Bremssystem durch zwei Hydraulikkreise redundant ausgelegt ist. Bei Ausfall eines Bremskreises kann dann nach wie vor, wenn auch in abgeschwächter Form, verzögert werden.

Elektrohydraulische Bremssysteme

Das Elektrohydraulische Bremssystem (EHB) ist eine Weiterentwicklung des hydraulischen Bremssystems. Ein Beispiel hierfür ist das von Bosch entwickelte elektrohydraulische Bremssystem SBC (Sensotronic Brake Control), Abbildung 8. Bei den EHB handelt es sich um sogenannte Brake-by-Wire-Systeme, die jedoch eine hydraulische Rückfallebene haben. Dies ist an den Trennventilen in der Abbildung ersichtlich. Dabei entspricht der Ausfall der EHB einem Ausfall des zweiten hinteren Bremskreises, die vom Fahrer aufgebrachte Bremskraft wirkt damit nur noch an den Vorderrädern.

Brake-by-Wire bedeutet, dass die vom Fahrer aufgebrachte Bremskraft elektrisch an die ECU (Electronic Control Unit) übertragen wird. Im Bild entspricht dies den beiden Blöcken „Bremsfunktionen“ und „Intelligentes Interface“. Eine Fremdkraft, z.B. eine elektrische Hydraulikpumpe in Verbindung mit einem Hochdruckspeicher, erzeugt die notwendige hydraulische Energie. Die ECU verteilt diese dann durch die Ansteuerung der entsprechenden Ventile im Modulator (Raddruckmodulator) an die jeweiligen Radbremsen.

Das Bremspedal ist, bei voller Funktionsfähigkeit des EHB, von den Radbremsen entkoppelt. Am Bremspedal kann ein vom Fahrzeughersteller gewünschtes Pedalgefühl eingestellt werden, z.B. kürzere notwendige Pedalwege bei gleichzeitig geringen Betätigungskräften. Durch die Entkopplung vom Hydraulikkreis spürt der Fahrer auch keine irritierenden Pedalvibrationen wie z.B. bei Regeleingriffen durch das ABS oder den Fahrdynamikregler (vgl. Winner et al., 2012), die von unerfahrenen oder nicht technisch-versierten Fahrern teilweise als Fehlfunktion der Bremse gedeutet werden. Mit

einem elektrohydraulischen Bremssystem können die genannten Bremsassistenzfunktionen besser umgesetzt werden als mit hydraulischen Bremssystemen. Zudem bieten sie Vorteile bei der Umsetzung (Entkopplung des Bremspedals) und dem dynamischen Verhalten.

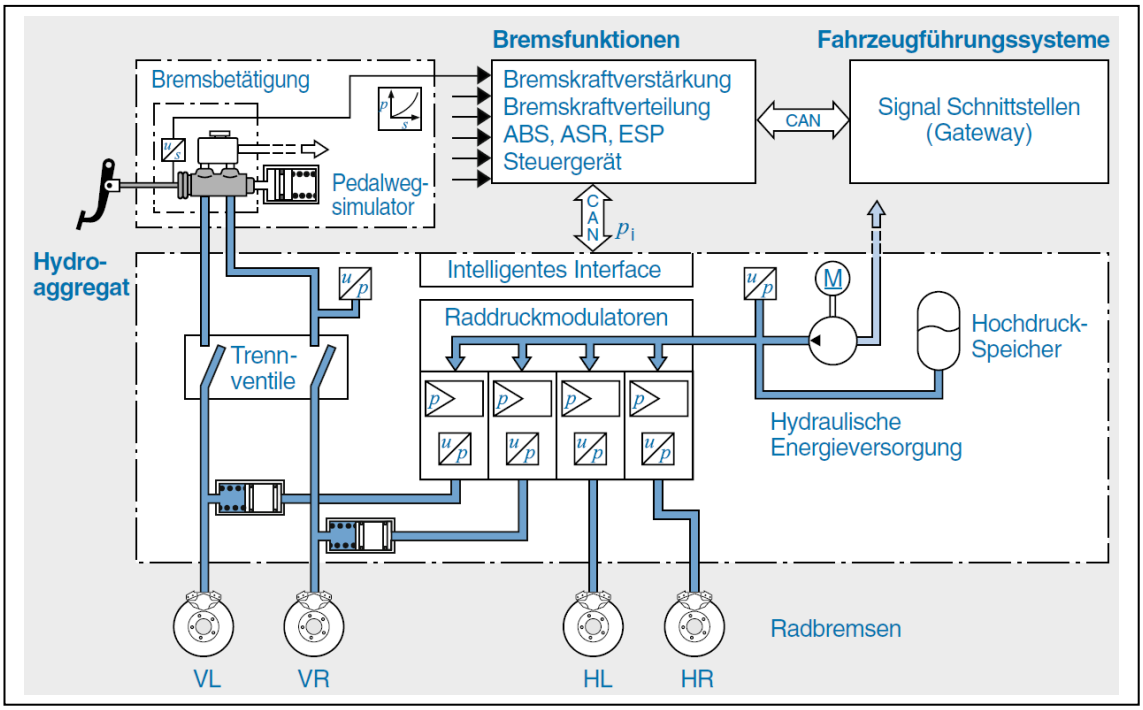


Abbildung 8: EHB am Beispiel der Bosch SBC. (Reif, 2010a; S. 153)

In Bezug auf Abbildung 7 auf Seite 30 verläuft die Wirkungskette von der Mensch-Maschine-Schnittstelle zum Block mit der Fremdkraft, der im Falle der EHB auch den Pedalgefühl-Simulator enthält. Im weiteren Verlauf folgen dann der Modulator und die Radbremsen, die schließlich das Bremsmoment erzeugen.

Elektromechanische Bremssysteme

Bei den elektromechanischen Bremssystemen (EMB) handelt es sich um „echte“ Brake-by-Wire-Systeme. Diese sind vollständig fremdkraftbetätigt, der Fahrerwunsch wird elektrisch an das System übertragen. Die Energieübertragung bis hin zur Betätigung der Radbremsen ist damit rein elektrisch umgesetzt. Dies hat den großen Vorteil, dass Fahrerassistenzsysteme deutlich einfacher umgesetzt werden können. Durch die fehlende mechanische/hydraulische Kopplung ist das EMB im Crashfall sicherer und kann außerdem ergonomischer gestaltet werden. Zudem wird keine Bremsflüssigkeit mehr benötigt und das EMB kommt durch die energetische Entkopplung des Fahrers vom Bremskreis ohne Bremskraftverstärker aus, was für den Fahrzeughersteller Vorteile bei der Handhabung, in der Montage sowie im Fahrzeug-Packaging bringt.

Durch den fehlenden mechanischen/hydraulischen Durchgriff vom Bremspedal zur Radbremse, müsste das System aus Gründen der aktuellen Gesetzgebung vollständig

zweikreisig aufgebaut werden – also inklusiver zweiter Bordnetzversorgung und zweiter Übertragungseinrichtung. Solche Systeme sind daher noch nicht im Serieneinsatz.

Bremssysteme bei Nutzfahrzeugen

(Elektro-)Hydraulische Bremsanlagen werden i.d.R. nur bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen verwendet. Bei (mittel-)schweren Nutzfahrzeugen kommen vorwiegend Druckluft-Fremdkraftbremsanlagen zum Einsatz, da die Pedalkräfte des Fahrers allein nicht ausreichen würden. Auf eine genauere Beschreibung wird an dieser Stelle verzichtet.

2.1.2.3 Ausblick

Wie gezeigt wurde, sind die technischen Systeme zur automatischen Fahrzeugverzögerung bereits in Serie vorhanden. Durch Weiterentwicklungen im Bereich der Umfeldsensorik wird die Objekterkennung zukünftig deutlich effizienter und zuverlässiger werden, dies beinhaltet z.B. auch die Erkennung von stehenden Hindernissen (notwendig z.B. an Stauenden), die Erkennung von Personen im Stadtverkehr usw.. Die vorgestellten Bremsassistenzsysteme können dazu beitragen, bestimmte Unfallarten zu vermeiden bzw. zumindest die Unfallfolgen deutlich abzuschwächen (siehe auch Abschnitt 2.1.3).

Analog zum ACC und allgemein im Hinblick auf das autonome Fahren, müssen jedoch auch die gesetzlichen Randbedingungen angepasst werden, da die technische Entwicklung in diesen Fällen den gesetzlichen Bestimmungen i.d.R. vorauseilt, wie auch bei Wiehen (2013) aufgeführt wird.

2.1.3 Auswirkungen von Fahrerassistenzsystemen zur Längsführung

Die Auswirkungen von Fahrerassistenzsystemen zur Längsführung auf die Verkehrssicherheit, die Fahrerakzeptanz und die Wirtschaftlichkeit bzw. den Kraftstoffverbrauch wird in zahlreichen Studien betrachtet. Bei Benmimoun et al. (2013) wird ein positiver Effekt von ACC-Systemen auf die Verkehrssicherheit ermittelt, da die Zeitlücken bei gleichbleibender Durchschnittsgeschwindigkeit größer ausfallen. Dadurch hat der Fahrer mehr Zeit zu reagieren, unterstützt wird die Fahrerreaktion zudem auch durch die vom ACC ausgegebenen Warnungen. In der Studie wurde durch die Verwendung von ACC die Anzahl der zeitkritischen Abstände um 73% reduziert. Auch eine niedrigere zeitliche Frequenz von starken Bremsvorgängen konnte ermittelt werden, was auch Auswirkungen auf den Verkehrsfluss haben wird. Außerdem wurde durch den ACC-Einsatz eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs von 2,77% bei Autobahnfahrten ermittelt.

Verschiedene von Winner et al. (2012) aufgeführte Studien kommen zu den Ergebnissen, dass das Fahren mit aktivem ACC-System von den Fahrern als deutlich sicherer, entspannter und weniger belastend als manuelles Fahren empfunden wird. Des Weiteren sollen 71% der Auffahrunfälle von Nutzfahrzeugen auf Autobahnen durch ACC-Systeme vermieden werden können. Es wird jedoch auch kritisch darauf hingewiesen, dass sich die Nutzer bei parallelen Nebentätigkeiten stärker ablenken lassen, was in deutlich längeren Blickabwendungen resultiert. So sei ein Sicherheitsgewinn erst dann wirklich zu erwarten, wenn sicherheitskritische Situationen noch besser behandelt werden können. Mehrheitlich wird dem ACC dennoch eine positive Auswirkung bescheinigt, die zukünftigen Entwicklungen beim ACC müssen jedoch stärker auch die sicherheitskritischen Gewöhnungseffekte berücksichtigen.

Auch die Bremsassistenzfunktionen, die zum Teil aus den ACC-Systemen hervorgegangen sind und mit diesen interagieren, haben eine positive Auswirkung auf die Verkehrssicherheit. Wie bei Reif (2010b) aufgeführt wird, können 88% der Auffahrunfälle, die durch Unaufmerksamkeit und/oder zu dichtes Auffahren entstehen, durch Fahrerassistenzsysteme zur Fahrzeuglängsführung beeinflusst werden.

2.2 Assistenzsysteme zur Querführung von Fahrzeugen

Erste Assistenzsysteme zur Querführung von Fahrzeugen waren Hilfskraftlenkungen, die sogenannten Servolenkungen, die die Betätigungskräfte beim Lenken reduzieren. Die erste hydraulische Servolenkung wurde 1926 vom US-amerikanischen Ingenieur Francis W. Davis zum Patent angemeldet. Sie kam hauptsächlich in schweren Fahrzeugen zum Einsatz, bevor sie erstmals im Jahr 1951 von Chrysler für Pkw angeboten wurde (Pfeffer und Harrer, 2011). Auf die verschiedenen Hilfskraftlenkungen wird im Abschnitt 2.2.1 eingegangen. Sie bilden die technische Grundlage für weitere Fahrerassistenzsysteme, bei denen Lenkmomente bzw. Lenkwinkel selbständig aufgebracht werden sollen. Damit bilden sie auch die Grundlage für die Umsetzung der automatischen Querführung bei der Kolonnenfahrt.

In der Europäischen Union sind Spurwechselvorgänge oder ein unbeabsichtigtes Verlassen des Fahrstreifens Ursache für mehr als ein Drittel aller tödlichen Unfälle (vgl. Winner et al., 2012). Hier sollen Spurhalte- und Spurwechselassistenzsysteme dazu beitragen, die Zahl dieser Unfälle zu reduzieren bzw. zumindest die Unfallschwere zu mindern. Dies soll durch die EU-Verordnungen 661/2009 und 351/2012 unterstützt werden. Darin wird festgelegt, dass bestimmte Nutzfahrzeuge ab dem Jahr 2013 bzw. 2015 mit Spurhaltewarnsystemen ausgestatten werden müssen. Auf die verschiedenen Systeme und Systemausprägungen wird in den Abschnitten 2.2.2 und 2.2.3 eingegangen.

2.2.1 Lenksysteme

In Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen kommen zwei wesentliche Arten der Hilfskraftlenkungen zum Einsatz: die hydraulische sowie die elektromechanische Lenkkraftunterstützungen. Bei (mittel-)schweren Nutzfahrzeugen kommen aufgrund der hohen Lenkkräfte i.d.R. nur (voll-)hydraulische Lenkungen zum Einsatz. Bei Pkw hat sich die Zahnstangenlenkung durchgesetzt, bei Nfz werden dagegen vor allem Kugelumlauflenkungen verwendet. Auf eine Beschreibung der konstruktiven Details wird an dieser Stelle jedoch verzichtet.

2.2.1.1 Hydraulische Hilfskraftlenkungen

Hydraulische Hilfskraftlenkungen (HPS, engl. Hydraulic Power Steering) sind – wie eingangs erwähnt – sehr weit verbreitet. Die einzelnen Komponenten einer hydraulischen Zahnstangenservolenkung sind in Abbildung 9 zu sehen.

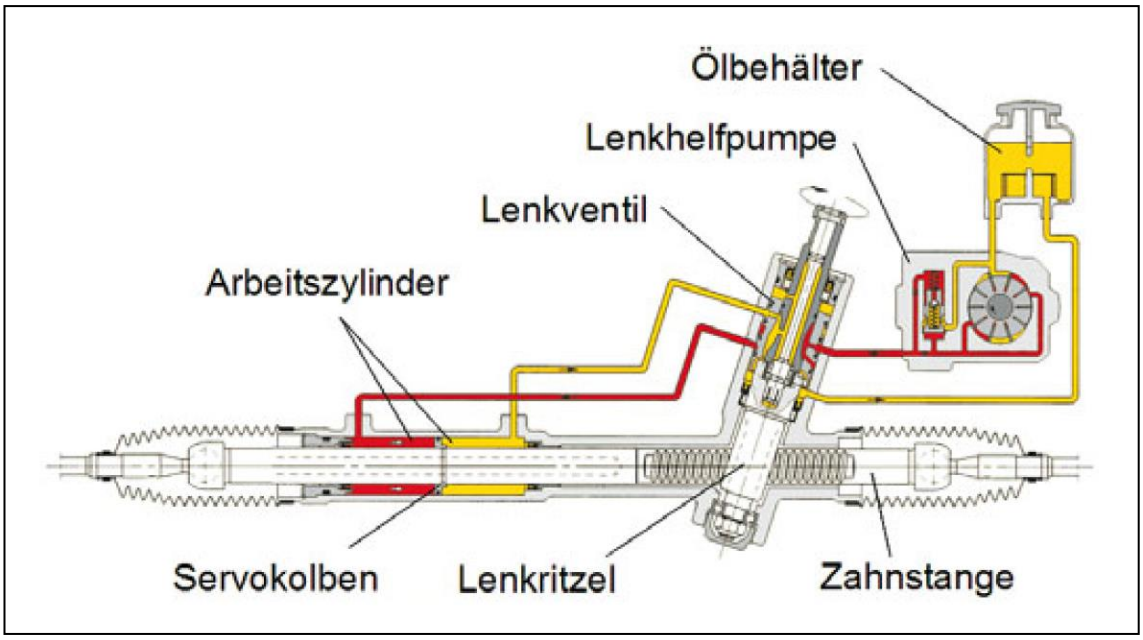


Abbildung 9: Konzept einer hydraulischen Zahnstangenservolenkung. (Winner et al., 2012; S. 288)

Bei den HPS wird die Lenkhelfpumpe ständig vom Verbrennungsmotor des Fahrzeugs angetrieben. Durch die Drehung des Lenkrads werden die Lenkventile angesteuert und somit der Arbeitszylinder mit seinen zwei Arbeitskammern (im Bild rot bzw. gelb dargestellt) entsprechend gefüllt. Durch eine unterschiedliche Druckbeaufschlagung resultiert eine Kraft auf den Servokolben, der mit der Zahnstange verbunden ist. Hierdurch wird, zusätzlich zur Betätigungskraft am Lenkrad, eine Kraft auf die Zahnstange ausgeübt. Eine Weiterentwicklung der HPS stellt die parametrierbare, von der Fahrzeugge-

schwindigkeit abhängige, Servolenkung dar. Hierdurch werden sowohl Komfort als auch Sicherheit gesteigert.

Bei der HPS wird die Lenkhelfpumpe, wie bereits erwähnt, ständig vom Verbrennungsmotor angetrieben. Dadurch ergeben sich vor allem bei Autobahnfahrten hohe Verluste, da in diesem Fall kaum Lenkkraftunterstützung benötigt wird. Abhilfe schafft eine elektrisch angetriebene, und damit ansteuerbare Lenkhelfpumpe. Diese Systeme sind auch unter der Abkürzung EHPS (Electro-Hydraulic Power Steering) bekannt und haben durch die Ansteuermöglichkeit einen geringeren Energiebedarf als HPS-Systeme.

Bei Nutzfahrzeugen kommen nach wie vor HPS-Systeme zum Einsatz, wobei auch hier seit 2013 das erste EHPS System im Mercedes-Benz Arocs eingesetzt wird (zusätzlich zur vorhandenen hydraulischen Lenkkraftunterstützung). Dadurch können aus dem Pkw bekannte Assistenzfunktionen wie eine aktive Lenkrückstellung sowie eine geschwindigkeitsabhängige Lenkkraftunterstützung umgesetzt werden (vgl. Zürn et al., 2013).

Prinzipiell könnten aktive Lenkeingriffe über die (elektro-)hydraulischen Hilfskraftlenkungen umgesetzt werden, der technische Aufwand ist jedoch relativ hoch. Hier haben elektromechanische Lenksysteme deutliche Vorteile.

2.2.1.2 Elektromechanische Lenksysteme

Die elektromechanische Hilfskraftlenkung EPS (Electric Power Steering) findet mehr und mehr Verbreitung, da sie durch ihre Parametrierbarkeit Vorteile beim Lenkkomfort bietet sowie einen geringeren Energiebedarf und Installationsaufwand gegenüber hydraulischen Hilfskraftlenkungen aufweist. Der Aufbau einer EPS ist in Abbildung 10 dargestellt. Bei den EPS gibt es verschiedene Anordnungsmöglichkeiten des Elektromotors. In der verwendeten Prinzipskizze ist der Elektromotor (hier: BLDC, bürstenloser DC-Motor) achsparallel angeordnet (EPSapa). Bei weiteren gängigen Ausführungen kann der Elektromotor – je nach Anforderungen an Bauraum und aufzubringendem Unterstützungsmoment – auch an der Lenksäule (EPSc), direkt am Lenkritzel (EPSp bzw. EPSdp), oder konzentrisch um die Zahnstange (EPSrc) angeordnet werden (vgl. Pfeffer & Harrer, 2011). Das vom Fahrer aufgebrachte Lenkmoment wird über einen Drehstab und Momentensensor ermittelt und in der ECU (engl. Electronic Control Unit, Steuergerät) ausgewertet. Dieses steuert wiederum den Motor an.

Mit elektromechanischen Servolenkungen können neben der grundsätzlich geforderten Servounterstützung verschiedenste Zusatz-/Assistenzfunktionen umgesetzt werden. Auf Fahrzeugebene sind hier unter anderem der Parklenkassistent, eine fahrdynamische Lenkmomentempfehlung sowie die später betrachteten Spurführungs- und Spurwechselsysteme zu nennen (vgl. Pfeffer & Harrer, 2011). Die EPS-Lenksysteme bilden,

vor allem auch aus regelungstechnischer Sicht, die technische Grundlage für die Querführung der verschiedenen Automatisierungsgrade.

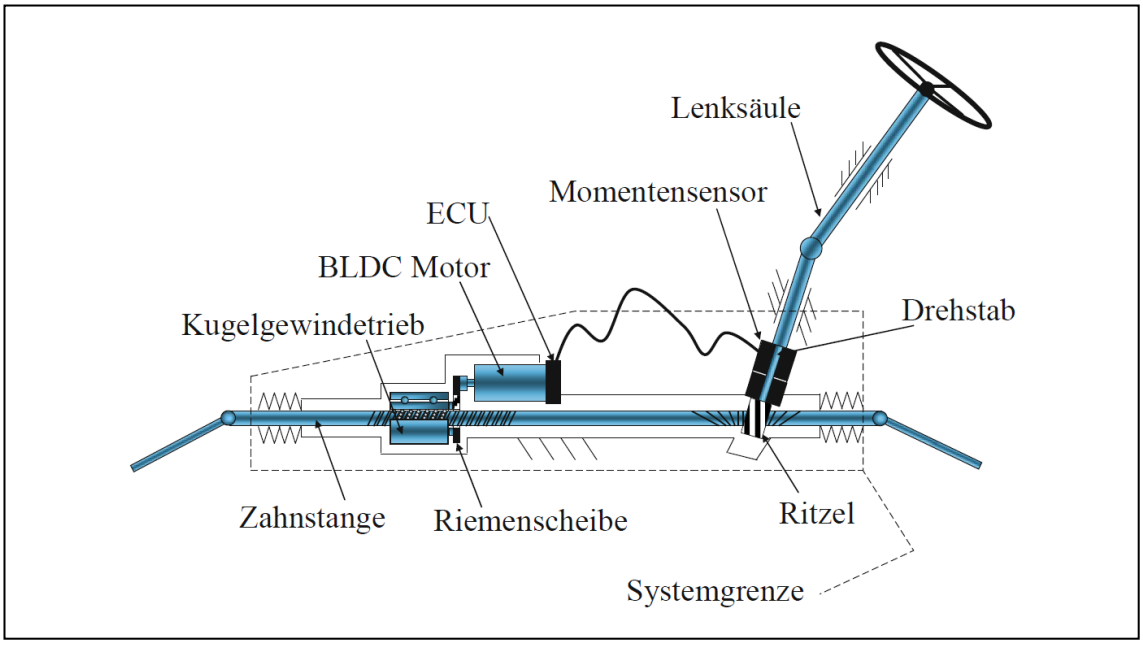


Abbildung 10: Prinzipieller Systemaufbau einer achsparallelen elektromechanischen Servolenkung. (Pfeffer & Harrer, 2011; S. 157)

Überlagerungslenkung

Bei konventionellen Lenkungen ist die Lenkübersetzung weitestgehend konstant. Es können lediglich kleine Änderungen durch angepasste Wälzkreisdurchmesser an der Zahnstange erzielt werden. Daher ist bei der Lenkübersetzung stets ein Kompromiss zwischen einer direkten Lenkung und geringen Lenkkräften z.B. beim Parkieren zu finden. Bei der sogenannten Überlagerungs- bzw. Aktivlenkung (AFS, engl. Active Front Steering) kann die Übersetzung aktiv dynamisch angepasst werden. Dadurch können die Lenkeigenschaften z.B. in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit und Lenkwinkel verändert werden.

Eine mögliche technische Umsetzung ist in Abbildung 11 dargestellt. Der Überlagerungswinkel wird in einem doppelten Planetengetriebe (Überlagerungsgetriebe) durch einen Elektromotor am Hohlrad aufgebracht. Das dargestellte System verfügt jedoch nach wie vor über eine elektrohydraulische Servounterstützung (am Lenkventil zu erkennen), eine elektromechanische Servounterstützung ist jedoch ebenfalls möglich. Wie bereits erwähnt, kann mit einer Überlagerungslenkung die Lenkübersetzung variabel gestaltet werden, beispielsweise in Abhängigkeit der Geschwindigkeit. Des Weiteren sind stabilisierende Lenkeingriffe möglich, z.B. bei Über- oder Untersteuern des Fahrzeugs bei Spurwechsel oder in Kurven, beim Bremsen auf unterschiedlichen Reibwerten (µ-Split) oder bei starken Seitenwinden (vgl. Pfeffer & Harrer, 2011).

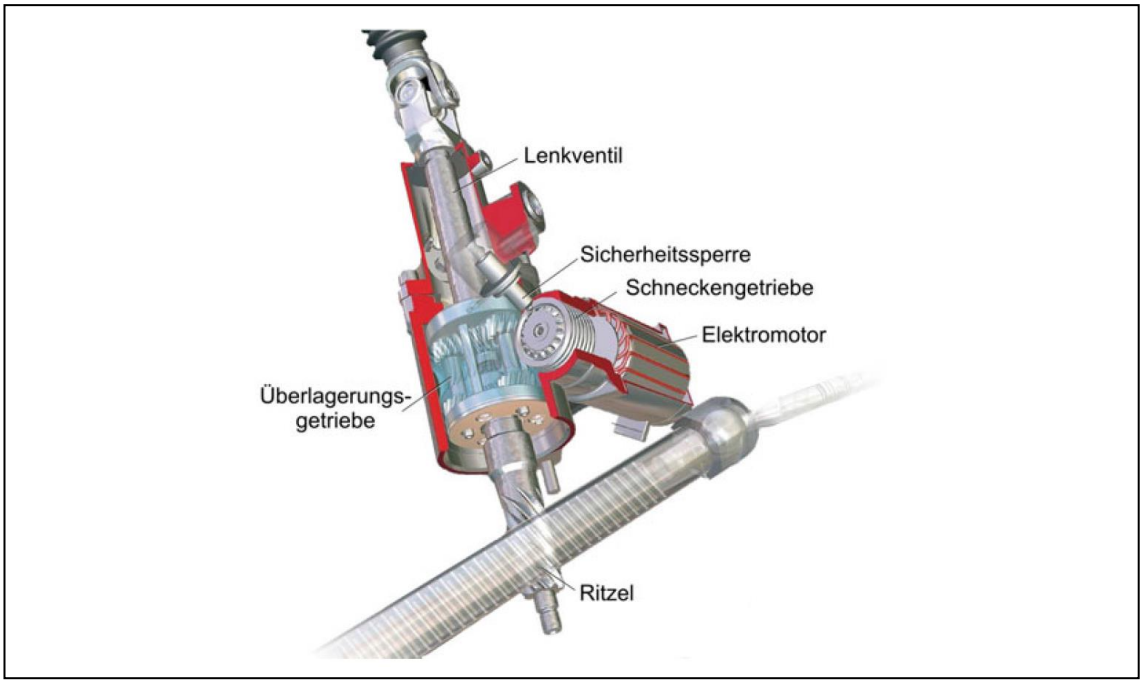


Abbildung 11: Schnittbild der BMW/ZF-Lenksysteme-Aktivlenkung. (Pfeffer & Harrer, 2011; S. 413)

2.2.1.3 Elektrische Lenksysteme

Bei rein elektrischen Lenksystemen (engl. Steer-by-Wire) besteht wie bei den Brake-by-Wire-Systemen kein mechanischer Durchgriff zwischen Lenkrad und den Rädern. Hierdurch ergeben sich große Vorteile beim Packaging sowie bei der Crashsicherheit. Assistenzsysteme können die Lenkwinkel am Lenkrad vollständig überlagern und wären daher, wie die elektromechanischen Lenksysteme, für die im Folgenden beschriebenen Assistenzsysteme zur Querführung bis hin zur vollautomatisierten Querführung bestens geeignet. Bisher gibt es noch keine reinen Steer-by-Wire-Systeme in Serie. Systeme mit mechanischer oder hydraulischer Rückfallebene stehen jedoch kurz vor der Markteinführung.

2.2.2 Spurführungssysteme

Bei den Fahrerassistenzsystemen zur Spurführung gibt es sowohl passive, i.d.R. warnende bzw. Aufmerksamkeit erregende Systeme, als auch aktive Systeme, die den Fahrer durch aktive Eingriffe bei der Querführung unterstützen. Sie sollen grundsätzlich verhindern, „dass ein Fahrzeug unbeabsichtigt vom Fahrstreifen abkommt“ (Winner et al., 2012; S. 548). Die passiven Systeme haben den Zweck der Fahrerinformation und werden dem Bereich der passiven Sicherheitssysteme zugeordnet. Aktive Systeme

lassen sich sowohl der Fahrzeugführung als auch in gewisser Weise der aktiven Sicherheit zuordnen, vgl. Abbildung 1 auf Seite 16.

Die passiven Systeme werden unter dem Begriff Spurhaltewarnsysteme bzw. LDW (engl. Lane Departure Warning) zusammengefasst. Bei den aktiven Spurhaltesystemen spricht man von LKS- (engl. Lane Keeping Support) oder auch von LDP-Systemen (engl. Lane Departure Prevention). Die beiden Systemtypen sowie ihre verschiedenen Ausprägungen und Entwicklungsstufen werden im Folgenden vorgestellt. Falls nicht anderweitig vermerkt, beziehen sich die folgenden Beschreibungen auf die von Winner et al. (2012).

2.2.2.1 Funktionen und Entwicklungsstufen

Spurhaltewarnsysteme

Die passiven Spurhaltewarnsysteme LDW sollen den Fahrer vor einem unbeabsichtigten Verlassen des momentan benutzten Fahrstreifens warnen. Die Fahrstreifen werden dabei über die Fahrstreifenmarkierungen von Bildverarbeitungssystemen erfasst, siehe Abschnitt 2.2.2.2 und. 3.4. Wird ein bestimmter Abstand zur Fahrstreifenmarkierung unterschritten oder ein definiertes Zeitkriterium verletzt, wird eine Warnung an den Fahrer ausgegeben. Diese können entweder visuell, akustisch, haptisch oder in Kombination erfolgen. Wird der Fahrtrichtungsanzeiger betätigt, wird das System kurzfristig deaktiviert, da der Fahrer in diesem Fall bewusst den Fahrstreifen wechseln möchte.

Visuelle Warnungen erfolgen über eingeblendete Symbole im Kombiinstrument oder im Head-up-Display (HUD). Rein visuelle Warnungen sind jedoch in den Situationen nutzlos, in denen der Fahrer „unaufmerksam oder gar eingeschlafen ist“ (Winner et al., 2012; S. 549). Im Gegensatz dazu sind akustische Warnungen effektiver und über die i.d.R. im Fahrzeug vorhandenen Lautsprecher relativ einfach umzusetzen. Da jedoch auch andere Systeme, wie z.B. ACC, auf akustische Warnungen setzen, kann eine Identifikation der Warnung schwierig sein. Bei rein akustischen Warnungen ist z.B. das sogenannte „Nagelbandrattern“ im Einsatz, dass die Geräusche nachbildet, die beim Überfahren von Markierungspunkten z.B. in Baustellenbereichen entstehen. In Probandenversuchen wurde das Nagelbandrattern von den Fahrern positiv aufgenommen, da es besonders bei Ablenkung und Müdigkeit effektiv warnt.

Eine deutlich größere Akzeptanz haben laut Winner et al. (2012) haptische Warnungen. Bei Vibrationen im Lenkrad wird der Fahrer unmittelbar darauf hingewiesen, dass er die Lenkung korrigieren muss. Alternativ können auch Lenkradmomente aufgebracht werden oder die haptische Warnung über Vibratorelemente im Fahrersitz erfolgen. Diese Varianten haben zusätzlich die Möglichkeit, Empfehlungen an den Fahrer weiterzugeben. Die Vibrationen, entweder im Lenkrad oder im Fahrersitz, sollten sich jedoch für eine bessere Wahrnehmbarkeit von den anderen üblichen Vibrationen im

Fahrzeug, abhängig vom Straßenbelag und der Fahrzeuggeschwindigkeit, unterscheiden.

Die Warnungen sind im Hinblick auf die Akzeptanz stets kritisch zu betrachten, da der Fahrer nicht bevormundet oder irritiert werden soll. Hier soll ein erweitertes Spurhaltewarnsystem (ALDW, Advanced-LDW) die Akzeptanz durch ein transparentes Verhalten verbessern. Durch eine Erkennung der Fahrerabsichten könnte z.B. auf kurvigen Landstraßen die Warnschwelle angepasst werden. Zudem wird die Information des Fahrers über den Systemzustand (System aktiv, Fahrstreifen wurde erkannt etc.) als sehr wichtig betrachtet.

Spurhaltesysteme

Im Gegensatz zu den Spurhaltewarnsystemen greifen die Spurhaltesysteme aktiv in das Lenksystem ein, um das Fahrzeug auf dem Fahrstreifen zu halten. Einsatzgebiete sind autobahnähnliche Straßen mit langen Geraden und lang gezogenen Kurven. Die Systeme sind aktuell jedoch so ausgelegt, dass sie den Fahrer unterstützen, nicht aber ersetzen sollen. Sie sind daher so eingestellt, dass der Fahrer stets die Hände am Lenkrad haben muss (sogenannte Hands-on-Erkennung), um anderweitige längere Ablenkungen oder gar freihändiges Fahren (Hands-off) zu vermeiden. Schließlich muss der Fahrer stets die Kontrolle über das Fahrzeug behalten. Bei Systemen mit Überlagerungslenkung ist es möglich, dass der Lenkeingriff durch das LKS-System für den Fahrer nicht spürbar ist. Damit dieser jedoch eine wahrnehmbare Rückmeldung über die Unterstützung bekommt, werden i.d.R. Lenkmomente aufgebracht (vgl. Abschnitt 2.2.2.2).

Die Grenzen der aktuell verfügbaren Systeme sind eng gesteckt. Einerseits wird durch einen festgelegten Geschwindigkeitsbereich sichergestellt, dass die Systeme beispielsweise nicht Innerorts eingesetzt werden. Andererseits sind Fehlinterpretationen bei der Fahrstreifenerkennung möglich, vor allem z.B. in Baustellenbereichen, bei nasser oder stark reflektierender Fahrbahn. Diese Situationen müssen erkannt und die Eingriffe in diesen Fällen z.B. deaktiviert und der Fahrer informiert werden.

Die Spurhaltesysteme sind für die automatische Querführung in der Kolonne notwendig. Zusätzlich zur Fahrstreifenerkennung kann jedoch auch das vorausfahrende Fahrzeug als Referenz dienen, was eine robustere Regelung ermöglichen würde.

2.2.2.2 Systemkomponenten und Systemaufbau

Sowohl LDW- als auch LKS-Systeme verwenden bildverarbeitende Systeme (siehe auch Kapitel 3.4), um die Fahrstreifenmarkierungen zu erkennen und daraus den befahrenen Fahrstreifen zu bestimmen. Die Fahrstreifenerkennungssysteme beinhalten

des Weiteren einen Algorithmus zur Auswertung und eine Entscheidungseinheit, die letztendlich die Warnung ausgibt bzw. den Eingriff auf das Fahrzeug einleitet.

Da es sich bei der Fahrstreifenerkennung um ein Bildverarbeitungssystem handelt, ist die erste Voraussetzung eine erkennbare Fahrstreifenmarkierung. Diese darf nicht zu stark verwittert oder z.B. mit Schnee bedeckt sein (Abbildung 12 rechts). Hinzu kommen länderspezifische Unterschiede bei der Art der Fahrstreifenmarkierungen. Die Lichtverhältnisse spielen ebenfalls eine wichtige Rolle, z.B. bei tiefstehender Sonne (Abbildung 12 links) oder nassen Fahrbahnen im Dunkeln. Zwei der erwähnten Beispiele sind in Abbildung 12 dargestellt. Im linken Bild steht die Sonne sehr tief, die dunkel reflektierten Fahrbahnmarkierungen werden nicht erkannt, stattdessen wird die hell reflektierende Bitumenfuge als Fahrbahnmarkierung erfasst. Im rechten Bild ist die rechte Fahrbahnmarkierung durch Schnee verdeckt, es kann nur die mittlere Markierung erkannt werden. Diese beiden Fälle zeigen, wie schwierig eine zuverlässige Fahrstreifenerkennung ist.

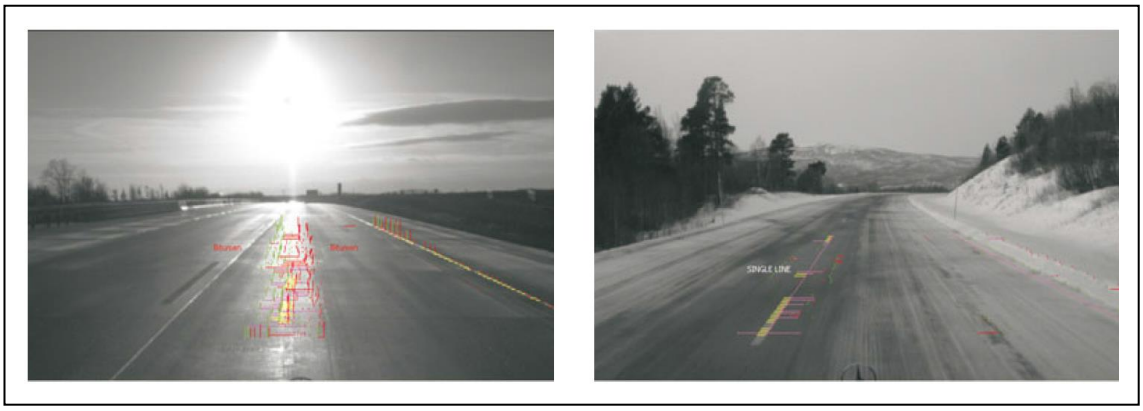


Abbildung 12: Extrembeispiele der Fahrstreifenerkennung, reflektierende Bitumenfugen links, mit Schnee bedeckte Fahrbahn rechts. (Winner et al., 2012; S. 547)

Während bei den LDW-Systemen im einfachsten Fall die Information ausreicht, ob gerade ein Fahrstreifen überfahren wird, sind die Anforderungen bei LKS-Systemen wesentlich höher, da ansonsten keine Regelung möglich ist. Es müssen beide Fahrbahnmarkierungen erfasst werden, um daraus die Fahrstreifenmitte und die Orientierung des Fahrzeugs im Fahrstreifen ermitteln zu können. Des Weiteren muss die Geometrie des vorausliegenden Abschnitts erkannt werden. Je nach Systemauslegung kann der Eingriff bei LKS-Systemen entweder den Sicherheitsaspekt abdecken, indem das eingeprägte Spurhaltemoment erst kurz vor der Fahrstreifenbegrenzung aufgeprägt wird, oder mehr den Komfortaspekt berücksichtigen, bei dem das Spurhaltemoment bei Abweichungen zur Fahrstreifenmitte ständig zunimmt, siehe Abbildung 13.

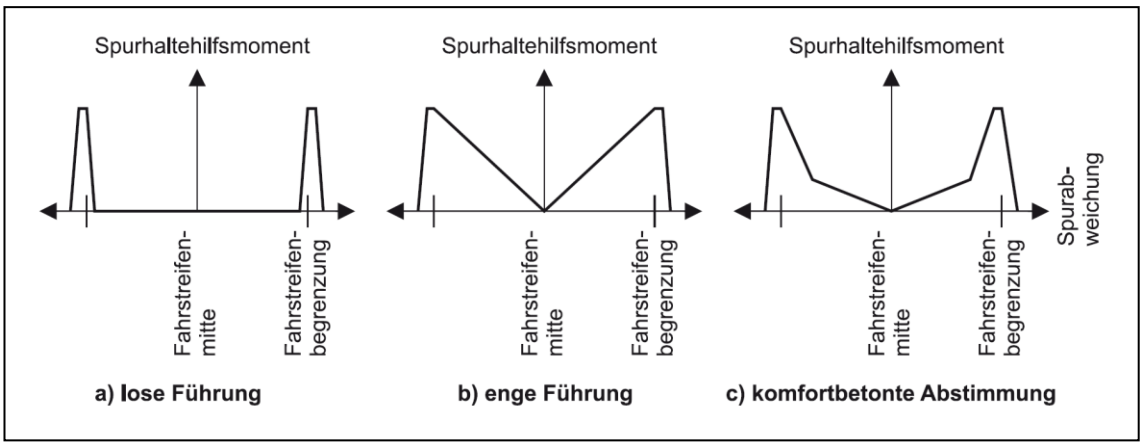


Abbildung 13: Eingeprägtes Spurhaltehilfsmoment in Abhängigkeit der Spurabweichung von der Fahrstreifenmitte. (Winner et al., 2012; S. 555)

Das Spurhaltemoment kann entweder über das Lenk- oder das Bremssystem aufgebracht werden. Bei Verwendung des Bremssystems werden einseitige Bremseingriffe durchgeführt, die ein Moment um die Fahrzeughochachse bewirken. Bei Eingriffen über das Lenksystem, was zumeist umgesetzt wird, kommen vor allem die beschriebenen elektromechanischen Lenksysteme bzw. die Überlagerungslenkung zum Einsatz.

2.2.2.3 Ausblick

Momentan liegt der Entwicklungsschwerpunkt sowohl bei den LDW- als auch bei den LKS-Systemen vor allem bei der Verbesserung der Fahrstreifenerkennung. Hier sollen verbesserte Algorithmen, die Berücksichtigung z.B. von Leitpfosten sowie weitere Informationen aus anderen Umfeldsensoren wie Radar oder LIDAR verwendet werden. Auch die Erkennung der Fahrerabsichten soll verbessert werden, um dessen Intention besser abschätzen und damit falsche Systemreaktionen vermeiden zu können.

2.2.3 Spurwechselsysteme

Spurwechselassistenzsysteme sollen den Fahrer bei Fahrstreifenwechselvorgängen unterstützen. Diese weisen ein sehr hohes Fehlerpotential auf, wie sich auch aus diversen Unfallstatistiken herauslesen lässt. Dabei werden i.d.R. entweder Verkehrsteilnehmer im sogenannten „Toten Winkel“ übersehen, oder die Geschwindigkeit von hinten herannahender, überholender Fahrzeuge wird falsch eingeschätzt (Winner et al., 2012). Letzteres kommt besonders häufig auf Autobahnen bzw. autobahnähnlichen Straßen vor. Bisher verfügbare Systeme in Serienfahrzeugen greifen genau diese beiden Punkte auf und warnen den Fahrer vor Fahrzeugen im Toten Winkel und vor Fahrzeugen, die sich schnell von hinten annähern.

Die Systemausprägungen werden allgemein in der ISO-Norm 17387 „Lane Change Decision Aid System“ (engl. LCDAS, Fahrstreifenwechsel-entscheidungsunterstützungssystem) beschrieben (vgl. Winner et al., 2012). Auf diese wird im Abschnitt 2.2.3.1 und 2.2.3.2 eingegangen. Systeme, die den Fahrer aktiv beim Fahrstreifenwechsel oder bei Einfädelvorgängen z.B. an Autobahneinfahrten unterstützen, sind in Entwicklung, jedoch noch nicht serienreif. Diese werden daher kurz in Abschnitt 2.2.3.3 beschrieben.

2.2.3.1 Funktionen und Entwicklungsstufen

Die ISO-Norm 17387 unterscheidet bei den LCDA-Systemen nach deren durch Umfeldsensoren überwachten Bereiche, wobei insgesamt drei Typen unterschieden werden. Systeme vom Typ I überwachen nur den Bereich links und rechts vom Fahrzeug, Systeme vom Typ II überwachen nur den Bereich hinter dem Fahrzeug (also Fahrzeuge, die sich von hinten annähern). Die Systeme vom Typ III decken beide Bereiche ab. Im Markt sind hauptsächlich Systeme vom Typ I und III verfügbar (Winner et al., 2012).

Die Unterstützung des Fahrers bei der grundlegenden Entscheidung über einen Fahrstreifenwechsel erfolgt i.d.R. über zwei Informationsstufen. Die erste Informationsstufe hat einen informativen Charakter. Sie informiert den Fahrer eher dezent über Fahrzeuge im Toten Winkel oder hinter dem Fahrzeug, solange keine Fahrstreifenwechselabsicht ermittelt wurde, Abbildung 14 oben. Lässt sich anhand verschiedener Auswahlkriterien, wie z.B. das Setzen des Fahrtrichtungsanzeigers oder die Position des eigenen Fahrzeugs innerhalb des Fahrstreifens (vgl. Abschnitt 2.2.2), eine Fahrstreifenwechselabsicht erkennen, so erfolgt die Fahrerinformation über eine intensivere Meldung in Stufe 2, Abbildung 14 unten (vgl. Winner et al., 2012). Bei dem in Abbildung 14 dargestellten System handelt es sich um den „Audi Side Assist“.

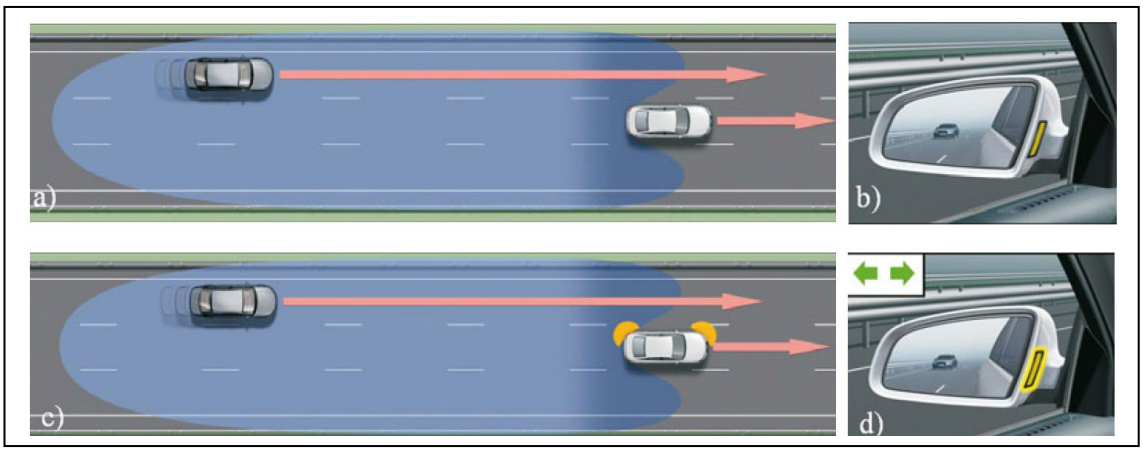


Abbildung 14: Beispiel für einen Fahrstreifenwechselassistenten. (Winner et al., 2012; S. 569)

Wie bei den Spurhaltewarnsystemen kann die Information des Fahrers optisch, akustisch oder haptisch erfolgen. Damit der Fahrer seiner Pflicht nachkommt, einen Spiegel- und Schulterblick durchzuführen, erfolgt die optische Information meist über Anzeigen im entsprechenden Außenspiegel (vgl. Abbildung 14).

2.2.3.2 Systemkomponenten und Systemaufbau

Wichtigster Bestandteil der gängigen Fahrstreifenwechselassistenten ist die Umfeldsensorik. Bei den Serienfahrzeugen kommen entweder Digitalkameras, also bildverarbeitende Systeme (vgl. Kapitel 3.4), oder (Nahbereichs-)Radarsensoren (vgl. Kapitel 3.2) zum Einsatz. Für Systeme vom Typ II und III kommen lediglich die Radarsensoren in Frage. Die Anforderungen an die Umfeldsensorik ergeben sich aus dem gewünschten Systemumfang. Bei Systemen vom Typ II und III muss die Erfassung der sich von hinten annähernden Fahrzeuge auch deren Fahrstreifen sowie deren Relativgeschwindigkeit ermitteln können, da z.B. Warnungen über gleichschnelle Fahrzeuge hinter dem eigenen Fahrzeuge nicht zur Fahrerakzeptanz des Systems beitragen.

2.2.3.3 Ausblick

Verbesserungen bei dem vorgestellten Fahrstreifenwechselassistent sind abhängig von der Umfeldsensorik. Außerdem sind Systeme in der Entwicklung, die den Fahrer beim eigentlichen Spurwechselvorgang, z.T. aktiv, unterstützen sollen.

Die ersten Weiterentwicklungen der LCDA-Systeme stellen dabei sogenannte manöverbasierte Assistenzsysteme dar, die den Fahrer bei entsprechenden Fahrmanövern durch Handlungsempfehlungen unterstützen (Habenicht, 2012), siehe auch Kapitel 2.3. Das von der TU Darmstadt sowie der Continental AG entwickelte Antikollisionssystem PRORETA gehört ebenfalls zur Kategorie der manöverbasierten Assistenzsysteme, das den Fahrer bei Überholvorgängen unterstützt. Hierzu wurde der abzudeckende Bereich der Umfelderfassung vor dem Fahrzeug deutlich erweitert. Durch Datenfusion der verschiedenen Umfeldsensoren (u.a. Radar und Bildverarbeitung) kann ermittelt werden, ob ein sicheres Überholen, abhängig vom Gegenverkehr, durchgeführt werden kann (Winner et al., 2012).

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut Verkehrssystemtechnik in Braunschweig, hat ebenfalls ein Konzept für ein Assistenzsystem zur Unterstützung des Fahrers bei Ein- und Ausfädelvorgängen entwickelt, wobei der Systemumfang hier von der Informations- und Warnebene bis hin zur automatisierten Längsführung reicht (Knake-Langhorst et al., 2013). Der Kern des Systems bildet, wie bei der manöverbasierten Assistenz von Habenicht (2012), die Lückenanalyse, die die Lücken erfasst und über einen Algorithmus entsprechend bewertet. Das System gibt dem Fahrer „zu Be-

ginn des Einfädelvorgangs eine Empfehlung, welche Zielposition bei Prädiktion der aktuellen Bedingungen die optimale für den Fahrer ist und wie diese Zielposition erreicht werden kann“ (Knake-Langhorst et al., 2013; S. 349). In einer weiteren Ausbaustufe des Systems ist eine automatisierte, aber stets übersteuerbare, Längsführung umgesetzt, bei der die Fahrzeuggeschwindigkeit so geregelt wird, dass das eigene Fahrzeug auf dem eigenen Fahrstreifen auf Höhe der Ziellücke gebracht wird. Das System soll für beliebige Fahrstreifenwechselvorgänge eingesetzt werden können.

2.2.4 Auswirkungen von Fahrerassistenzsystemen zur Querführung

Wie bei Winner et al. (2012) aufgeführt wird, haben LDW- und LKS-Systeme ein großes Potential bei der Unfallprävention, da 25 % aller Unfälle durch Abkommen vom Fahrstreifen verursacht werden. Es muss jedoch bei den LKS-Systemen berücksichtigt werden, dass Fahrer durch das Vertrauen in das System verstärkt anderen Nebentätigkeiten nachgehen könnten, was durch eine sorgfältige Systemauslegung verhindert werden muss (z.B. Hands-On-Kontrolle).

Eine weitere, ebenfalls bei Winner et al. (2012) aufgeführte Studie kommt zu dem Ergebnis, dass durch LDW-Systeme 49 % aller Unfälle mit Nutzfahrzeugen durch Abkommen vom Fahrstreifen vermieden werden könnten (bzw. 4 % aller Unfälle). Bei aktiven Eingriffen, also LKS-Systemen, könnten bereits 72 % vermieden werden (bzw. 6 % aller Unfälle). Die anerkannte Wirksamkeit der LDW- und LKS-Systeme zeigt sich auch in der ab November 2013 umzusetzenden EG-Verordnung 661/2009.

2.3 Kombinierte Systeme zur Längs- und Querführung von Fahrzeugen

Die in Kapitel 2.1 (Längsführung) und 2.2 (Querführung) vorgestellten Assistenzsysteme können für verbesserten Komfort und verbesserte Sicherheit auch kombiniert werden. In Kombination werden sie auch für die autonome Kolonnenfahrt benötigt, da bei dieser mindestens die Folgefahrzeuge (siehe Definition in Kapitel 7.1) automatisch geführt werden sollen.

In Serie werden bereits die Systeme ACC und LKS angeboten, die den Fahrer sowohl in der Längs- als auch gleichzeitig in der Querführung unterstützen können. Als neuestes Beispiel kann hier die im Mai 2013 vorgestellte Mercedes-Benz S-Klasse (Typ W/V 222) aufgeführt werden, deren ACC-System auch für den Stop&Go-Verkehr ausgelegt ist, während der Lenk-Assistent den Fahrer bei der Querführung unterstützt und durch ein gezieltes Aufbringen von Lenkmomenten das Fahrzeug in der Fahrstreifenmitte halten kann (mit Hands-on-Erkennung). Bei geringer Geschwindigkeit kann das Spurhaltesystem sich über die Stereokamera auch am vorausfahrenden Fahrzeug orientieren, falls die Fahrbahnmarkierungen nicht sichtbar oder nicht eindeutig sind (Daimler

AG, 2013b). Vor allem diese Funktion wird für die Querführung der Folgefahrzeuge bei der autonomen Kolonnenfahrt relevant sein.

Wie allgemein bekannt ist, muss der Fahrer stets die Kontrolle über die Fahrzeugführung haben (vgl. Kapitel 7.2). Wie bei Winner et al. (2012) aufgeführt wird, führt dies jedoch dazu, dass vom Fahrer eine neue und erweiterte Bedienfähigkeit dieser Systeme verlangt wird, da er ständig dazu bereit sein muss, wieder die vollständige Fahrzeugführung zu übernehmen und die Assistenzsysteme zu übersteuern. Die Assistenzsysteme bergen jedoch die Gefahr, dass sich der Fahrer zu sehr auf die Systeme verlässt, worunter wiederum die Aufmerksamkeit leidet. Dadurch können Situationen vom Fahrer falsch erfasst werden und im schlimmsten Fall misslingt die Übernahme der vollständigen Fahrzeugkontrolle. Daher besteht die Forderung nach integrierten Gesamtkonzepten bzw. nach kooperativen Fahrzeugführungskonzepten zwischen Fahrer und automatisiertem System. Ansätze hierfür werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Neben der zu Beginn des Kapitels 2 vorgestellten Einteilung hinsichtlich passiver und aktiver Komfort- und Sicherheitssysteme, können die Systeme auch abhängig von der Unterstützungsebene in Bezug auf die menschliche Informationsverarbeitung eingeteilt werden (vgl. Habenicht, 2012). Diese Einteilung ist in Abbildung 15 dargestellt. Die menschliche Informationsverarbeitung erfolgt dabei in den drei Schritten Perzeption, Kognition und Handlung, die entsprechend durch Assistenzsysteme unterstütz werden können.

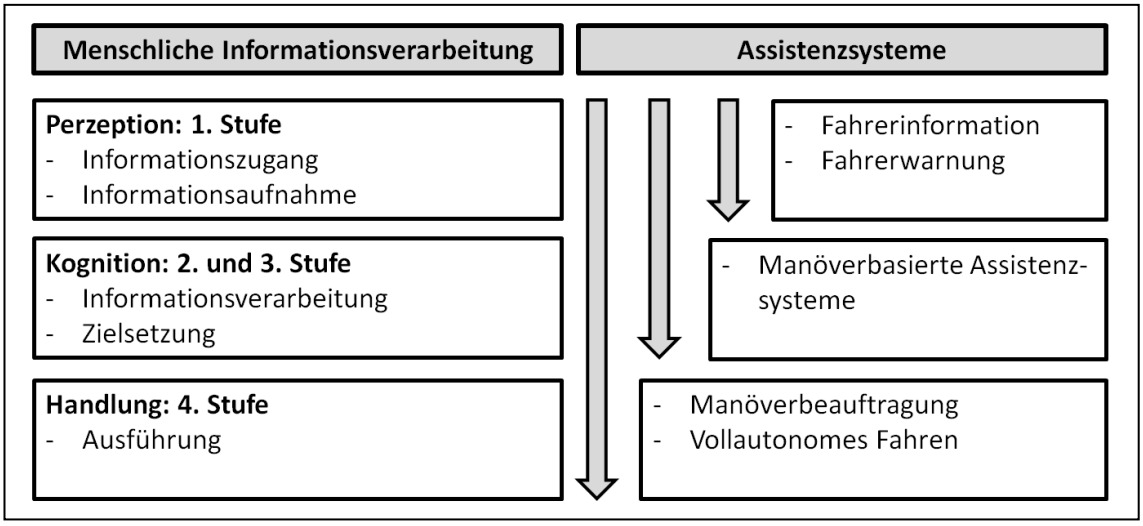


Abbildung 15: Klassifizierung von Assistenzsystemen in Abhängigkeit der menschlichen Informationsverarbeitung. (In Anlehnung an Habenicht, 2012; S. 7 und 8)

Ein Beispiel für Assistenzsysteme auf der Perzeptionsebene ist die Spurverlasswarnung LDW. Assistenzsysteme, die die Perzeptions- und Kognitionsebenen abdecken, unterstützen den Fahrer durch Handlungsempfehlungen und werden z.B. bei Habenicht (2012) und Winner et al. (2012) als manöverbasierte Assistenzsysteme bezeich-

net (siehe Abschnitt 2.3.1). Assistenzsysteme, die alle drei Ebenen abdecken, können Manöver z.B. nach Beauftragung durch den Fahrer autonom durchführen (kooperative Fahrzeugführung) oder es handelt sich bereits um vollautomatisiert fahrende Fahrzeuge (siehe Abschnitt 2.3.2).

2.3.1 Manöverbasierte Fahrerassistenzsysteme

Manöverbasierte Assistenzsysteme unterstützen den Fahrer bei der Bahnführung des Fahrzeugs, also sowohl bei der Längs- als auch bei der Querführung, durch Handlungsempfehlungen (Habenicht, 2012). Hierzu zählen z.B. die in Kapitel 2.2.3.3 vorgestellten Fahrstreifenwechselassistenzsysteme, aber auch Systeme zur Parkführung, usw.. Bei diesen Systemen spielt die Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI) eine bedeutende Rolle, da der vom Fahrer zu verarbeitende Informationsfluss stetig größer wird. Die Interaktion kann über den visuellen, den akustischen und den haptischen Kanal erfolgen (vgl. Reif, 2010b).

Für die autonome Kolonnenfahrt können die manöverbasierten Fahrerassistenzsysteme beispielsweise bei den Koppelvorgängen relevant sein, wenn diese vom Fahrer durchgeführt werden müssen. Dabei können sie den Fahrer darüber informieren, welche Position er in der Kolonne einnehmen soll oder wie und wann er die Kolonne verlassen sollte, z.B. in Abhängigkeit von den nicht zur Kolonne gehörenden Verkehrsteilnehmern. Für die Erstellung der Handlungsempfehlungen muss das gesamte Fahrzeugumfeld überwacht werden, wobei hier auch die Informationsweitergabe über die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation verwendet werden kann, siehe Kapitel 5.

Für eine detailliertere Beschreibung dieser Systeme wird an dieser Stelle auf die weiterführende Literatur verwiesen, z.B. auf den Fahrstreifenwechselassistent von Habenicht (2012), die Ausführungen bei Winner et al. (2012) und Knake-Langhorst (2013).

2.3.2 Manöverbasierte Fahrzeugführungssysteme

Manöverbasierte Fahrzeugführungssysteme unterstützen den Fahrer bei der Manöverausführung oder führen diese (partiell) automatisiert durch, vgl. Habenicht (2012). Bei Winner et al. (2012) werden diese Konzepte auch als „kooperative Fahrzeugführung“ bzw. „kooperative Automation“ bezeichnet. Diese können die Grundlage für z.B. (teil-) automatisierte Kopplungsvorgänge bei der Bildung von Fahrzeugkolonnen (Kapitel 9.1 und 9.2) sein und werden daher kurz vorgestellt. Falls nicht anderweitig erwähnt, beziehen sich die Beschreibungen auf die bei Winner et al. (2012).

2.3.2.1 Kooperative Automation

Bei der kooperativen Fahrzeugführung erfolgt die Zusammenarbeit entweder in Form einer Delegation von Teilaufgaben oder in Form einer Unterstützung bei der Ausführung einer Teilaufgabe. Die Kooperationskonzepte werden anhand der Anordnung und der zeitlichen Wirkreihenfolge von Fahrer und Assistenzsystem im Wirkkreis Fahrer-Assistenzsystem-Fahrzeug klassifiziert. Bei der Anordnung wird zwischen „paralleler“ und „serieller“ Assistenz unterschieden, bei der zeitlichen Reihenfolge zwischen „simultaner“ und „sequenzieller“ Assistenz.

Bei der *parallelen Assistenz* wirkt der Fahrer über die Mensch-Maschinen-Schnittstelle (MMS bzw. HMI) direkt auf das Fahrzeug, das Fahrerassistenzsystem (FAS) liegt parallel dazu. Bei der parallel-simultanen Assistenz erhält das FAS die Informationen aus der MMS und kann diese additiv ergänzen, Abbildung 16 oben (Seite 49). Auf das Fahrzeug wirken damit sowohl das FAS als auch der Fahrer. Als Beispiel können Spurhaltesysteme (LKS) genannt werden, bei denen der Fahrer das Lenkrad betätigt und das LKS-System abhängig vom Fahrzustand und der Fahrzeugposition im Fahrstreifen ein Zusatzmoment überlagert. Bei der parallel-sequenziellen Assistenz, Abbildung 16 mittig, wirkt entweder der Fahrer über die MMS auf das Fahrzeug oder das FAS allein. Dies ist in der Abbildung durch den logischen Schalter dargestellt. Als Beispiel kann hier ACC genannt werden, bei dem der Fahrer die unmittelbare Fahrzeuglängsführung an das FAS abgibt (vgl. Kapitel 2.1). Durch Eingriffe über die ACC-Bedienung, das Brems- oder Fahrpedal kann der Fahrer das System jedoch jederzeit übersteuern.

Bei der *seriellen Assistenz* wirkt der Fahrer nur durch das FAS auf das Fahrzeug, der Fahrer kann das FAS nicht umgehen, Abbildung 16 unten. Als Beispiele für die seriell-simultane Assistenz können hier Steer-by-Wire-Systeme (vgl. Kapitel 2.2) und das Antiblockiersystem ABS aufgeführt werden. Die Lenkeingabe des Fahrers wird über die MMS an das FAS weitergegeben und von diesem umgesetzt, ebenso wird beim ABS der vom Fahrer aufgebrachte Bremsdruck über das ABS-Hydroaggregat an die Radbremsen weitergegeben. Die seriell-sequenziellen Systeme haben die gleiche Anordnung, arbeiten jedoch ereignisdiskret. Der Fahrer beauftragt in diesem Fall, ein bestimmtes Manöver durchzuführen, das das FAS anschließend umsetzt. Als Beispiel kann ein auf Fahrerbefehl automatisch durchgeführtes Fahrstreifenwechselmanöver aufgeführt werden. Seriell-sequenzielle Systeme können aufgrund ihrer ereignisdiskreten Steuerung also nicht für Assistenzsysteme auf der Stabilisierungsebene eingesetzt werden (z.B. als Fahrdynamikregler).

Bei Winner et al. (2012) wird außerdem darauf hingewiesen, dass die Assistenz und Automation der Fahrzeugführung zusammenhängende Entwicklungen sind, da sie auf ähnliche Techniken im Fahrzeug zurückgreifen. Außerdem kann weiterhin zwischen manuellem, assistiertem, teil-, hoch- oder vollautomatisiertem Fahren unterschieden werden (siehe auch Glossar, Stichwort „autonomes Fahren“). Die Rolle des Fahrers

reicht dabei vom Fahrzeugführer und assistierten Fahrer, vom Kontrolleur komplexer Automation bis hin zum Passagier, wobei generell rechtliche und sicherheitstechnische Fragestellungen beantwortet werden müssen.

Im Folgenden werden die Umsetzungen der beiden Konzeptausprägungen paralleler und serieller Assistenz anhand der beiden Forschungsprojekte „Conduct-by-Wire“ und „H-Mode“ vorgestellt (ebenfalls nach den Beschreibungen bei Winner et al., 2012).

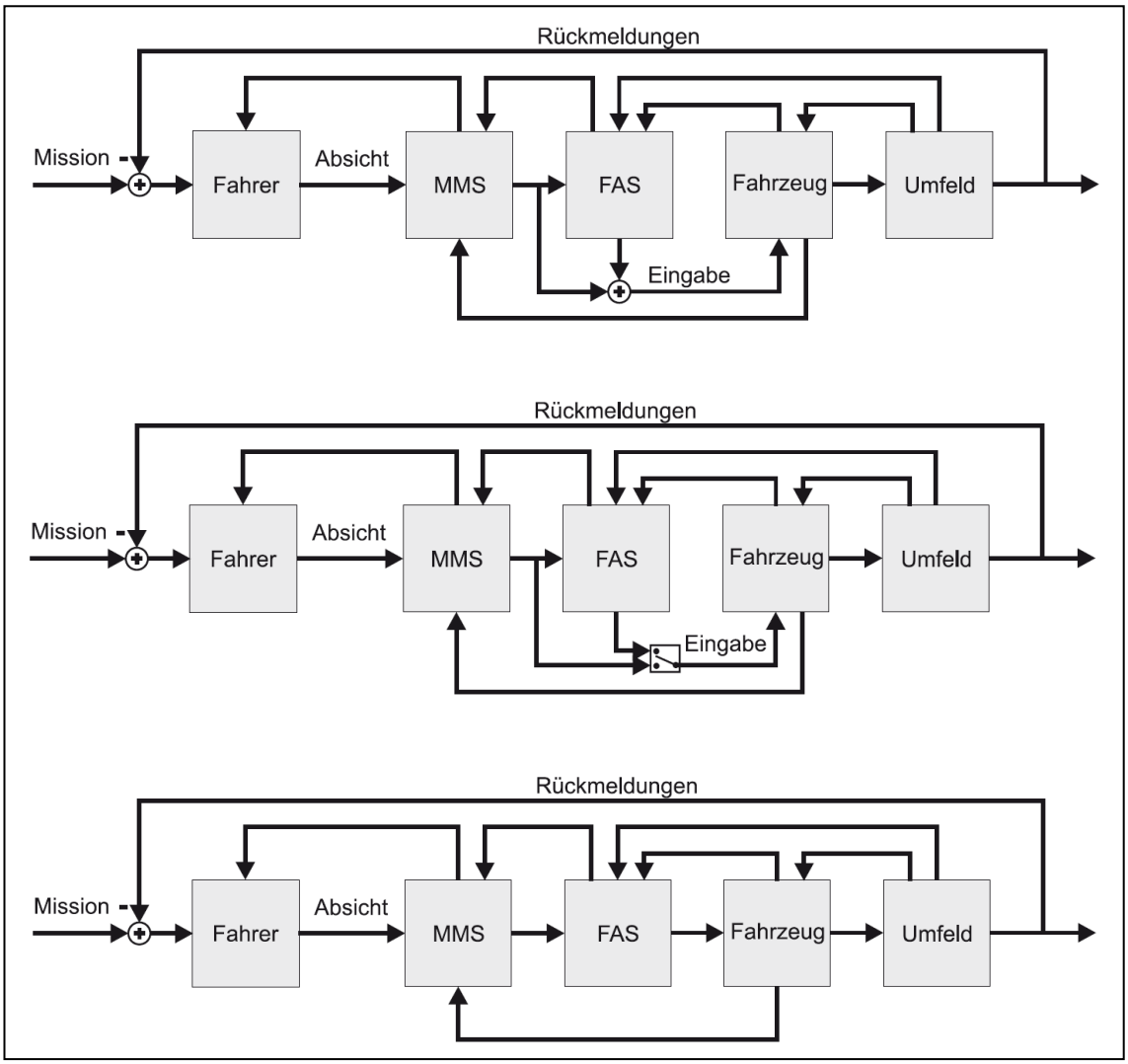


Abbildung 16: Parallel-simultane (oben), parallel-sequenzielle (mittig) und serielle (unten) Assistenzkonzepte. (Winner et al., 2012; S. 642-644)

2.3.2.2 Conduct-by-Wire

Das Conduct-by-Wire-Konzept (CbW) hat u.a. zum Ziel, die Komplexität der Bedienung für den Fahrer wieder zu reduzieren (engl. to conduct: leiten, führen, dirigieren). Bei Conduct-by-Wire leitet der Fahrer das Fahrzeug durch Manöverwünsche (z.B. „Fahrstreifen wechseln“, „Fahrzeug überholen“), die in einem sogenannten Manöverkatalog

abgelegt sind. Es handelt sich also um ein seriell-sequenzielles System (vgl. Abbildung 16 unten). Das Fahrzeug führt die Befehle dann entsprechend der Situation aus. Die Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) wird zur „Manöverschnittstelle“. Das Unterstützungsniveau (vgl. Abbildung 15, Seite 46) von CbW ist abhängig vom Umfeld (Autobahn oder Stadtverkehr) und von den Möglichkeiten der vorhandenen Umfeldsensorik. Beim geringsten Unterstützungsniveau hat das CbW-System eine seriell-simultane Ausprägung, da die Richtungseingaben des Fahrers über die MMS z.B. durch ein Steer-by-Wire-System umgesetzt werden.

Das Conduct-by-Wire-Konzept wird an der TU Darmstadt zur Entwicklung manöverbasierter Fahrzeugführungs- und Assistenzkonzepte verwendet.

2.3.2.3 H-Mode

Das H-Mode-Konzept beschreibt die Kooperation zwischen Fahrer und Automation über eine Reiter-und-Pferd-Metapher (H für engl. Horse (Pferd)). Das Unterstützungsniveau kann dabei fließend zwischen „Tight Rein“, also „straffe Zügel“, und „Loose Rein“, „lockere Zügel“, variiert werden (Abbildung 17).

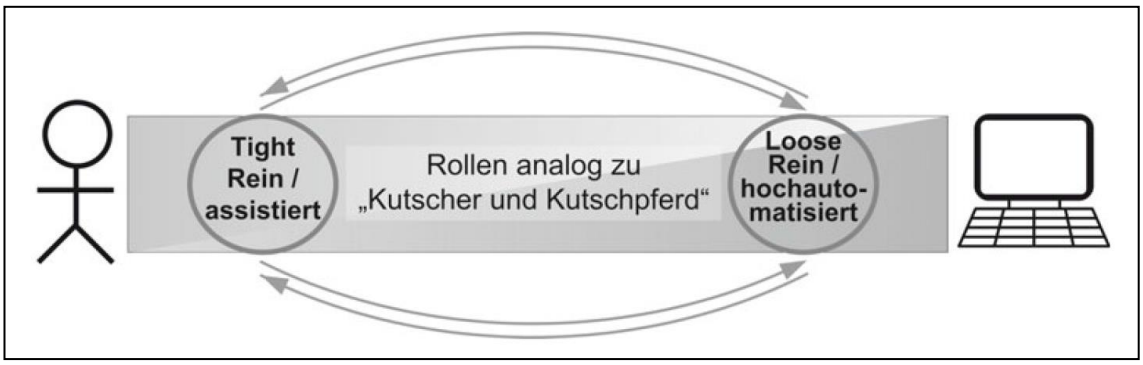


Abbildung 17: H-Mode Metapher. (Winner et al., 2012; S. 647)

Im Tight Rein-Modus entspricht der Wirkkreis einer parallel-simultaner Kooperation, da die einzelnen Fahrzeugbewegungen sehr genau vom Fahrer vorgegeben werden. In Bezug auf die Pferde-Metapher wird das Pferd in diesem Fall durch straffe Zügel geführt. Der Loose Rein-Modus entspricht dem hochautomatisierten Fahren in Form der seriell-sequenziellen Kooperation, bzw. bei Verwendung der Metapher wird dem Pferd mehr Freiraum gegeben. Bei dem kontinuierlichen Übergang vom Tight Rein- zum Loose Rein-Modus wird die Fahrereingabe über das MMS immer weniger gewichtet.

Laut Winner et al. (2012) ermöglicht der H-Mode für den Fahrer eine intuitive Bedienung eines hochautomatisierten Fahrzeugs. Das DLR und die TU München verwenden den H-Mode zur Gestaltung der kooperativen Zusammenarbeit zwischen Fahrer und hochautomatisiertem Fahrzeug.

2.4 Ausblick

Die in diesem Kapitel vorgestellten Fahrerassistenzsysteme und Konzepte entstanden etwa in den letzten 20 Jahren, wobei die Innovationszyklen ständig kürzer werden (vgl. Winner et al., 2012). Die Marktdurchdringung der auf der Umfelderfassung basierenden Assistenzsysteme ist jedoch eher mäßig, da die Systeme noch verhältnismäßig teuer sind. Dabei tragen die Systeme einen wesentlichen Anteil an der Reduktion der Unfallzahlen bzw. bei der Verringerung der Unfallschwere bei. Gesetzliche Maßnahmen, wie sie z.B. von der EU durchgeführt werden, können die Entwicklung und Marktdurchdringung von Assistenzsystemen fördern.

Wie bei Winner et al. (2012) aufgeführt wird, ergeben sich für die (nahe) Zukunft vor allem Herausforderungen bei der Umsetzung integrierter Bedienungskonzepte, die nach Möglichkeit eine Hersteller-übergreifende intuitive Bedienung von Fahrerassistenzsystemen zulassen. Außerdem wird im Hinblick auf die Umweltbilanz von Assistenzsystemen darauf hingewiesen, dass diese zwar durch ihr zusätzliches Gewicht und den zusätzlichen Leistungsbedarf zu einem Mehrverbrauch führen, dieser jedoch z.B. durch die Auswirkungen der assistierten Längsführung überkompensiert werden kann.

Im Hinblick auf die Kolonnenfahrt sind ebenfalls noch viele technische und rechtliche Hürden zu meistern (siehe Kapitel 7). Die vorgestellten Systeme müssen intelligent zu einem Gesamtkonzept vernetzt werden. Neben einer größeren Marktdurchdringung der vorgestellten Systeme ist vor allem auch eine Kommunikation zwischen den Fahrzeugen einer Kolonne notwendig, siehe hierzu Kapitel 5.

Für die allgemeine Verkehrssicherheit spielen die vorgestellten Assistenzsysteme aufgrund ihrer geringen Marktdurchdringung momentan noch eine eher untergeordnete Rolle. Ihre Wirksamkeit wird jedoch in zahlreichen Studien bestätigt. Eine weitere Senkung bei der Anzahl der Unfälle und eine Verringerung der Unfallschwere kann nur durch aktive Assistenzsysteme (in Verbindung mit entsprechenden passiven Sicherheitssystemen) erreicht werden. Ein Schritt, um diese Ziele zu erreichen, ist die ab 2013 von der EU vorgeschriebenen Ausstattungspflicht bestimmter Nutzfahrzeuge mit Notbrems- und Spurhaltewarnsysteme und die ESC-Ausrüstungspflicht für alle EU-Neufahrzeuge ab Oktober 2014.

Die in diesem Kapitel vorgestellten bereits verfügbaren bzw. in der Entwicklung befindlich Fahrerassistenzsysteme und Kooperationskonzepte zwischen Fahrer und Fahrzeug sind wichtige Meilensteine auf dem langen Weg zum vollautomatisierten Fahren. Das hoch- und vollautomatisierte Fahren wird im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte seit geraumer Zeit entwickelt und erprobt. Auf eine Auswahl aktueller Projekte wird in Kapitel 6 eingegangen.

3 Sensorik für die Umfelderfassung

Für die Umsetzung der in Kapitel 2 beschriebenen Assistenzsysteme werden Informationen über die Fahrzeugumgebung benötigt, ebenso für eine „elektronisch gebundene“ Kolonnenfahrt. Die Erfassung der Fahrzeugumgebung erfolgt durch die sogenannte Umfeldsensorik. Die damit zu erfassenden Bereiche um das eigene Fahrzeug werden in Abschnitt 3.1 aufgezeigt. Anschließend werden die einzelnen Sensortechniken vorgestellt.

3.1 Erfassungsbereiche der Umfeldsensorik

Der zu erfassende Bereich um das Egofahrzeug kann grob in einen Nah- und Fernbereich eingeteilt werden. Bei Reif (2010b) werden diese – wie in Abbildung 18 dargestellt – definiert.

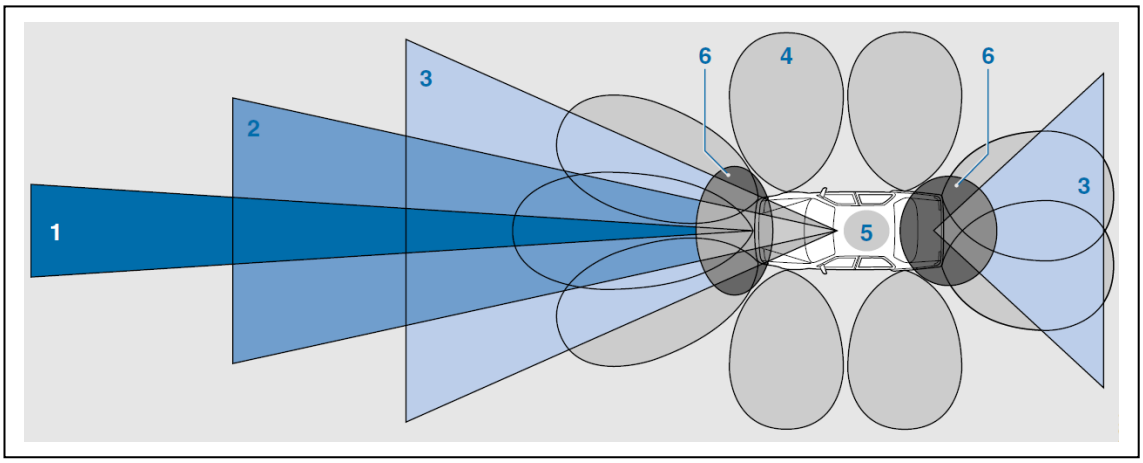


Abbildung 18: Einteilung der durch die Umfeldsensorik zu erfassende Bereiche. (Reif, 2010b; S. 130)

Die einzelnen Bereiche und die verwendbare Umfeldsensorik sind in Tabelle 1 auf Seite 53 zusammengefasst (Bereichsdefinitionen vgl. Reif, 2010b).

Für die Kolonnenfahrt sind insbesondere für die Längsführung die Radar- und LIDAR-Technologien relevant, für die Querführung spielen vor allem bildverarbeitende Systeme eine wichtige Rolle, während die Umfelderfassung insgesamt durch die Fusion verschiedener Sensordaten verbessert werden kann. Diese Punkte werden in den folgenden Abschnitten betrachtet.

Bereich	Reichweite	verwendete Umfeldsensorik						Anwendungsbeispiele
		LRR	SRR	LIDAR	IR	VB	US	
1	Fernbereich < 200 m	+	-	-	-	-	-	• ACC • (LCDAS)
2	Fern-/Nahbereich < 150 m (ggf. auch im Heckbereich)	+	-	+	+	-	-	• ACC • LCDAS • (LDW) • Nachtsichtsysteme mit Fußgängererkennung usw.
3	Außenbereich < 80 m	+	+	+	+	+	-	• ACC • LCDAS • LDW/LKS • Nachtsichtsysteme • Verkehrszeichenerkennung • Fußgängererkennung • Kreuzungsassistenz
4	Nahbereich < 20 m	+	+	+	+	+	-	
5	Fahrzeuginnenraum	-	-	-	+	+	-	• Fahrerbeobachtung • Innenraumüberwachung für Sicherheitssysteme
6	Ultranahbereich < 4,5 m	0	0	+	+	+	+	• ACC • Parkassistenzsysteme

LRR = Long-Range-Radar / SRR = Short-Range-Radar / LIDAR = Light Detection and ranging / IR = Infrarot und Time-of-Flight-Techniken / VB = Video- und Bildverarbeitung / US = Ultraschall

+ = geeignet / 0 = bedingt geeignet / - = ungeeignet

Tabelle 1: Bereiche der Umfelderfassung, Umfeldsensorik und Anwendungsbeispiele.

3.2 Radar-Sensorik

Die Radartechnik wird zur Ortung bzw. Erkennung, Entfernungsmessung und Messung von Relativgeschwindigkeiten verwendet. Der Begriff Radar steht entsprechend für „Radio Detection and Ranging“, also Erkennung und Entfernungsmessung mit Funkwellen (vgl. Reif, 2010b).

Das Radar sendet elektromagnetische Wellen (Funkwellen) aus, die an der Oberfläche von Metallen oder anderen reflektierenden Materialien zurückgeworfen, und vom Empfangsteil wieder aufgefangen werden. Zur Ortung und „Verfolgung“ von anderen Fahrzeugen werden Informationen über deren longitudinalen und lateralen Abstand sowie deren Relativgeschwindigkeit benötigt. Der longitudinale Abstand lässt sich aus der Laufzeit zwischen Aussenden der Wellen und Empfang der reflektierten Welle bestimmen. Die Relativgeschwindigkeit kann mit Hilfe des Dopplereffekts (siehe auch Kapitel 4.2.2.1) ermittelt werden. Der laterale Versatz wiederum ergibt sich entweder durch das Schwenken eines einzelnen Strahls (Scannen), oder aus mindestens zwei parallel ausgesendeten und ausgewerteten Radarsignalen (vgl. Reif, 2010b). Aus diesen Größen können wiederum aus der zeitlichen Ableitung weitere Relativgeschwindigkeiten bzw. Relativbeschleunigungen ermittelt werden.

Je nach Verwendungszweck bzw. benötigter Reichweite werden verschiedene Frequenzbereiche verwendet. Hier kommen in der Fahrzeugtechnik vor allem das Long Range (LRR) sowie das Short Range Radar (SRR) zum Einsatz, vgl. Tabelle 1 auf Seite 53. Aufgrund der benötigten Funkzulassung sind die Frequenzbereiche international festgelegt.

Die Entwicklung der Radartechnologie wurde zu Beginn hauptsächlich vom militärischen Anwendungsbereich angetrieben. Seit den Anwendungen in der Fahrzeugindustrie wird die Entwicklung jedoch stark gefördert, vor allem im Hinblick auf die Massenproduktion. Gegenüber LIDAR-Sensoren (Abschnitt 3.3) muss man zwar eine geringere Auflösung hinnehmen, Radarsensoren haben jedoch eine geringe Anfälligkeit gegenüber äußeren Bedingungen (Regen, Nebel etc.) und können außerdem den Dopplereffekt direkt messen und damit Relativgeschwindigkeiten bestimmen (Winner et al., 2012). Durch Datenfusion mit Kamerasystemen könnte die Umfelderfassung deutlich verbessert werden, siehe Abschnitt 3.5.

3.3 LIDAR-Sensorik

Neben der Radartechnologie werden, vor allem in Asien, auch LIDAR-Sensoren zur Umfelderfassung bei ACC-Systemen verwendet. Die LIDAR-Technologie (Light Detection and Ranging) beruht zwar auf einem ähnlichen Prinzip wie das Radar, arbeitet jedoch in einem anderen Wellenlängenbereich. Der LIDAR-Sensor sendet modulierte Infrarotstrahlung aus, die von Objekten reflektiert wird. Die reflektierten Wellen werden

von Fotodioden im Sensor empfangen und anschließend mit den ausgesendeten Wellen verglichen. Die räumliche Auflösung ist höher als beim Radar, die Reichweite jedoch geringer. Außerdem sind die Messungen stärker von den äußeren Bedingungen abhängig, weshalb die Messreichweite stark beeinflusst werden kann (Nebel, Gischt etc. dämpfen die Infrarotstrahlen stark). Ein weiterer Nachteil gegenüber dem Radar besteht bei der Ermittlung der Relativgeschwindigkeit, die sich nur durch die zeitliche Ableitung des Entfernungssignals berechnen lässt – und damit deutlich fehleranfälliger ist (vgl. Reif, 2010b).

Andererseits ergeben sich durch die Eigenschaften von LIDAR weitere Möglichkeiten. So können mit dem LIDAR-Sensor auch wiederum die Sichtweite und Sichtverhältnisse ermittelt werden. Des Weiteren haben sie Vorteile gegenüber der Radartechnologie bei der Verfolgung von Objekten (dem Tracking). Da sie zusätzliche Kostenvorteile bieten, könnten LIDAR-Sensoren vor allem in der Mittel- und Kompaktklasse vermehrt zum Einsatz kommen (vgl. Winner et al., 2012).

3.4 Maschinelles Sehen

Zur Erfassung der Fahrzeugumgebung verwendet der Fahrer, neben seinem Gehör, hauptsächlich sein visuelles System, die Augen. Es ist also naheliegend, auch für bestimmte Fahrerassistenzsysteme auf Bildverarbeitungsmethoden zu setzen.

Bei einem Videosystem wird die Umgebung (die Bildquelle) auf einem Bildsensor (engl. Imager, Bildwandler) abgebildet. Auf diesem wird das Licht in elektrische Ladung gewandelt und kann dann elektronisch weiterverarbeitet werden. Bei Fahrerassistenzsystemen geht es entweder darum, Bilder z.B. für Nachtsichtsysteme möglichst kontrastreich darzustellen, oder Informationen aus der Bildverarbeitung zu gewinnen, beispielsweise für eine Verkehrszeichenerkennung oder einen Spurhalteassistenten (Reif, 2010b).

Die Möglichkeiten der Bildverarbeitung sind in Abbildung 19 zusammengefasst. Für die autonome Kolonnenfahrt dürften in erster Linie die Stufen der Detektion, Erkennung und Messung relevant sein.

Für die Verkehrszeichen- und Spurerkennung sind Monokameras ausreichend. Bei der Spurerkennung werden die Kontrastunterschiede zwischen Straßenbelag und Spurmarkierung ausgewertet (vgl. Reif, 2010b). Stereokameras liefern gegenüber Monokameras auch die Tiefeninformationen zum aufgenommenen Bild (Winner et al., 2012).

Durch Kamerasysteme können andere Umfeldsensoren sinnvoll ergänzt werden. Vor allem die Objektdetektion ermöglicht es, die Größe von den z.B. durch das Radar erfassten Objekten besser abzuschätzen. Auf die Datenfusion verschiedener Umfeldsensoren wird in Abschnitt 3.5 kurz eingegangen.

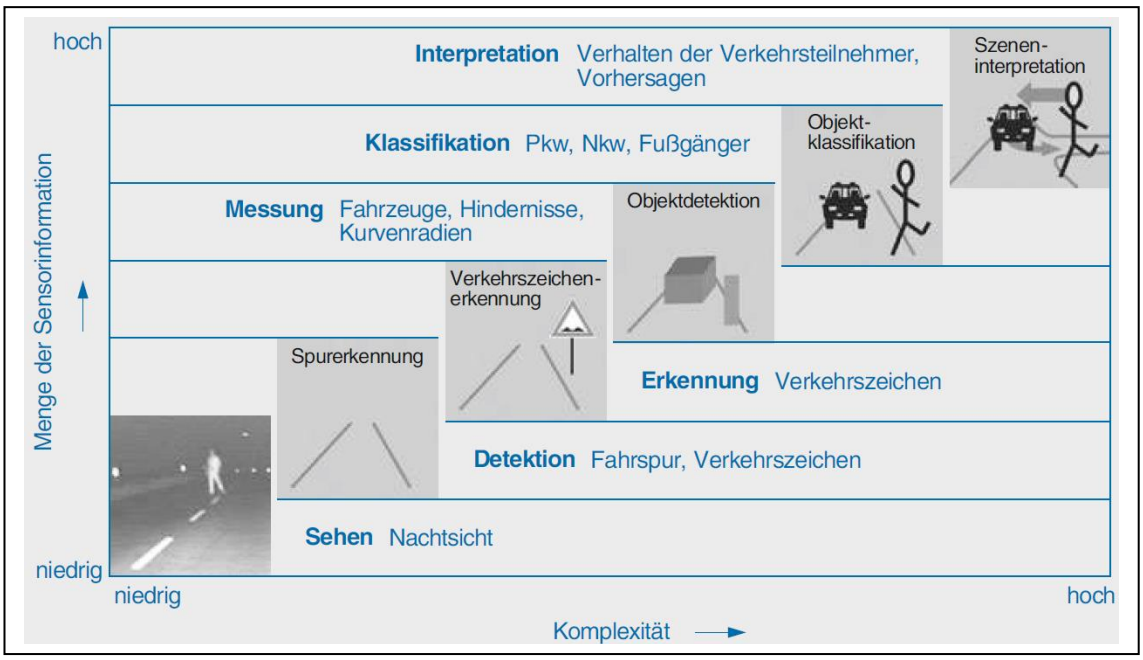


Abbildung 19: Stufen der Bilderkennung. (Reif, 2010b; S. 205)

Zur Vervollständigung sind an dieser Stelle noch die Techniken Range-Imager bzw. Time-of-Flight sowie das sogenannte 6D-Vision zu nennen, mit denen dreidimensionale Bilder der Fahrzeugumgebung erstellt werden können. Bei 6D-Vision ist es zusätzlich möglich, bewegte Objekte zu erfassen und deren Bewegungsrichtung abzuschätzen. Details zu diesen Systemen sind in der aufgeführten Literatur zu finden[2]. In der Kolonnenfahrt können diese Systeme ergänzend zur Fahrstreifenerkennung verwendet werden, um eine robustere Querführung durch „Verfolgung“ des vorausfahrenden Fahrzeugs zu erreichen.

3.5 Datenfusion verschiedener Sensoren

Einzelne Sensortechnologien haben jeweils spezifische Vor- und Nachteile. So eignet sich das Radar besonders gut für die Ermittlung von Positionen und Geschwindigkeit von Objekten, die Objekte selbst können jedoch bisher nicht Klassifiziert werden. Hierin haben wiederum die LIDAR-Technologie und die Techniken des Maschinellen Sehens ihre Stärken. Im Gegensatz zum Radar sind diese jedoch empfindlicher bei schwierigen Umgebungsbedingungen wie Nebel oder Gischt. Durch die Kombination zweier oder mehrerer verschiedener Sensorkonzepte, z.B. Radar und Bildverarbeitung oder Nah- und Fernbereichsradar, können deren Vorteile zusammengeführt werden (Winner et al., 2012).

[2] Informationen zum 6D-Vision-System siehe http://www.6d-vision.de (zuletzt abgerufen am 08.05.2013); weitere Literatur zu den genannten Techniken ist z.B. bei Winner et al. (2012) sowie Reif (2010b) zu finden.

Für Fahrerassistenzsysteme spielt vor allem die Detektion (Vorhandensein eines Objekts) sowie das Tracking (Ermittlung von Position und Geschwindigkeit eines Objekts) und Klassifizierung (Zuordnung eines Objekts, z.B. Fahrzeug, Person, Gebäude) eine große Rolle. Diese verschiedenen Anforderungen kann durch Datenfusion mehrerer Umfeldsensoren besser entsprochen werden, wie bei Winner et al. (2012) aufgeführt wird. So können Güte und Robustheit der Objektschätzungen verbessert werden, da die verschiedenen Sensoren redundante sowie sich ergänzende Informationen über dasselbe Objekt liefern. Nachteilig ist jedoch die zunehmende Komplexität des Gesamtsystems, was sich auch auf die Kosten auswirkt.

Für die Kolonnenfahrt wird die Datenfusion verschiedener Umfeldsensoren eine wichtige Rolle spielen. Dabei werden für die Längsführung der einzelnen Fahrzeuge exakte – und vor allem auch hochdynamische – Informationen über die zeitlichen bzw. räumlichen Abstände zu den vorausfahrenden Fahrzeugen benötigt. Gleiches gilt für Informationen zur Querführung bezüglich der Lage im Fahrstreifen sowie zum lateralen Versatz der Einzelfahrzeuge.

© VuV 2013

4 Informationserfassung für die Fahrzeugkommunikation

Mit der Einführung neuer Fahrerassistenzsysteme steigt die Anzahl der Sensoren, die die Umgebung eines Fahrzeugs beobachten. Die Vernetzung dieser Daten erlaubt eine digitale Rekonstruktion des Fahrzeugumfeldes. Im Hinblick auf die verschiedenen Formen des automatisierten Fahrens werden jedoch oft nicht nur Informationen aus dem direkten Fahrzeugumfeld benötigt, sondern beispielsweise auch Informationen eines vorausliegenden Streckenabschnitts, der noch nicht von den Sensoren des eigenen Fahrzeugs erfasst werden kann. Dies setzt voraus, dass Fahrzeuge miteinander kommunizieren und Informationen austauschen (vgl. Cramer, 2013). Im Rahmen dieses Kapitels soll daher erläutert werden, in welchen Wirkungsbereichen Informationsaustausch stattfindet, welche Informationen hierfür relevant sind und wie diese ermittelt werden.

4.1 Wirkungsbereiche verschiedener Informationssysteme

Nach Reif (2010b) lassen sich Fahrerassistenzsysteme u.a. in Abhängigkeit ihres Wirkungsfeldes klassifizieren. Darin inbegriffen sind die Funktionen der Informationserfassung und der Informationsweitergabe.

Innerhalb des Fahrzeugs wirken Fahrerinformationssysteme. Primäre Informationssysteme liegen in der Nähe des direkten Sichtbereichs des Fahrers und zeigen beispielsweise Fahrgeschwindigkeit, einfache Navigationshinweise oder ACC-Betriebsgrößen im Kombiinstrument oder in einem Head-up-Display (HUD) in der Windschutzscheibe an. Sekundäre Informationssysteme befinden sich auf der Mittelkonsole und liefern weniger wichtige Informationen wie Kartendarstellung des Navigationssystems, Radiosender oder Innenraumtemperatur. Weitere Möglichkeiten zur Fahrerinformation bieten akustische Signale, wie sie bei Einparkpiepsern verwendet werden, oder haptische Signale beispielsweise in Form von Vibrationen im Lenkrad beim Überfahren einer durchgezogenen Fahrstreifenmarkierung.

Außerhalb des Fahrzeugs unterscheidet Reif (2010b) zwischen dem Vorausschaubereich, dem Kommunikationsbereich und dem sensierbaren Bereich, siehe Abbildung 20.

Navigationssysteme wirken im Vorausschaubereich und erlauben eine Positionsbestimmung des eigenen Fahrzeugs. Mithilfe von Kartendaten sind Fahrtrouten erstellbar. Je nach Ausstattung des Systems werden auch aktuelle Verkehrsinformationen in die Routenwahl miteinbezogen. Mobilfunknetze wirken ebenfalls über große Distanzen und können dem Vorausschaubereich zugeordnet werden. Auch wenn sie heute hauptsächlich der privaten Kommunikation dienen, ist auch eine Verwendung beispielsweise für das automatische Absetzen von Notrufen möglich.

Im Kommunikationsbereich findet die Kommunikation zwischen Fahrzeugen (Car-to-Car-Communication, kurz: C2CC), aber auch zwischen Fahrzeugen und Infrastruktureinrichtungen (Car-to-Infrastructure-Communication, kurz C2IC) statt. Allgemein wird die Kommunikation eines Fahrzeugs mit seinem Umfeld auch als Car-to-X-Communication (kurz: C2XC) bezeichnet. Die große Verbreitung und ständige Weiterentwicklung der Funksysteme für den Heim- und Bürobereich (Wireless Local Area Network, kurz WLAN) macht diese auch für den Einsatz in Fahrzeugen interessant. Die Kommunikation zwischen den Verkehrsteilnehmern und der Verkehrsinfrastruktur bietet eine Vielzahl an Möglichkeiten zur Steigerung der Verkehrssicherheit. Eine situationsgerechte Übermittlung von Informationen beispielsweise zu Unfällen, einem plötzlichen Stauende oder zu vereister Fahrbahn ermöglicht es den Verkehrsteilnehmern, das Fahrverhalten rechtzeitig an die neue Situation anzupassen.

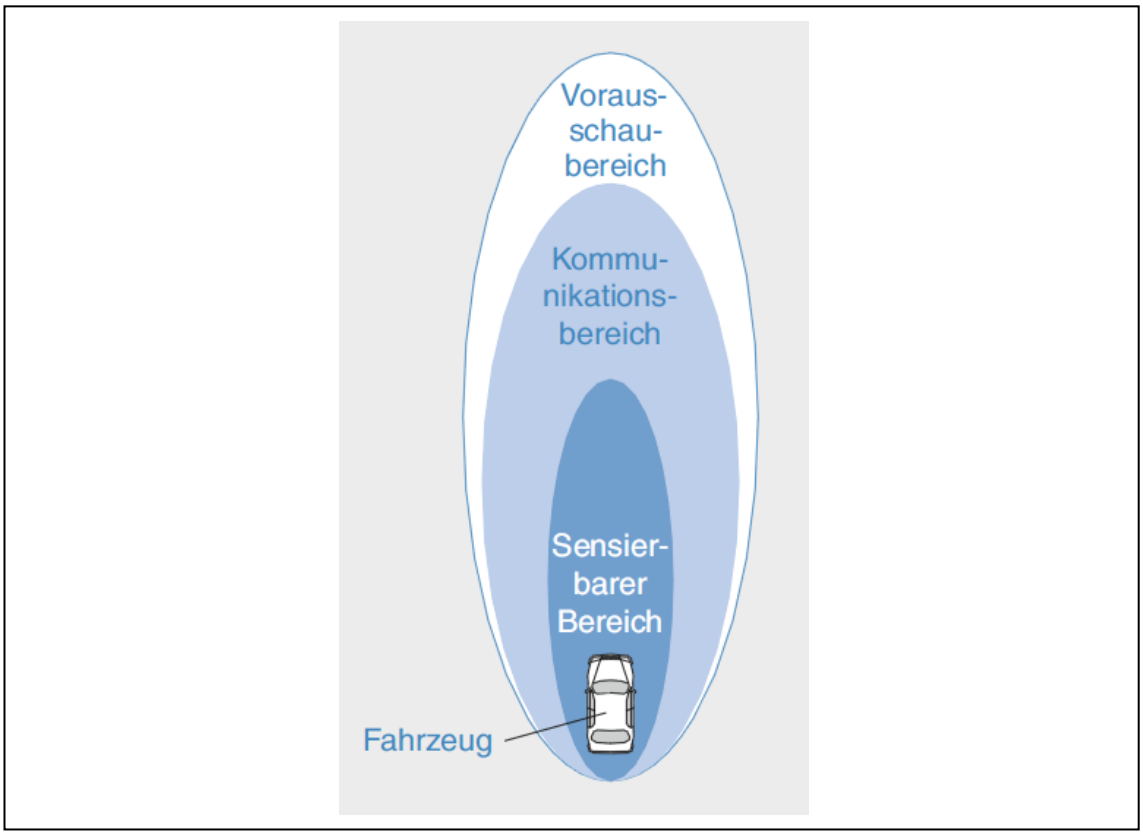


Abbildung 20: Wirkungsbereiche der Informationssysteme. (Reif, 2010b; S. 107)

Im sensierbaren Bereich arbeitet die Fahrzeugsensorik, die im Zusammenhang mit den Fahrerassistenzsystemen zur Längs- und Querführung im Fahrzeug verbaut ist. Hierbei wird das Umfeld um das Fahrzeug beobachtet und ausgewertet. Im Falle einer Gefahrensituation wird der Fahrer entweder gewarnt (z.B. Ultraschall-Einparkhilfen) oder das Fahrzeugverhalten wird durch einen direkten Eingriff des Assistenzsystems beeinflusst (z.B. ACC). Technische Hintergründe und Funktionsweisen verschiedener Fahrerassistenzsysteme werden in Kapitel 2 beschrieben.

Die vorgestellten Kommunikationspfade Navigation, Mobilfunk, C2XC und Fahrzeugsensorik, auf denen Informationen von der Außenwelt in das Fahrzeug und letztendlich zum Fahrer gelangen, fördern mithilfe der technischen Unterstützung das vorausschauende Fahren und steigern somit den Fahrkomfort und die Fahrsicherheit, siehe auch Kapitel 2.1.3. Während Navigationssysteme bereits heute sehr verbreitet sind und die in Kapitel 2 vorgestellten Fahrerassistenzsysteme in immer mehr Fahrzeugen angeboten werden, befindet sich die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation derzeit noch in der Entwicklung.

Um zukünftig autonomes Fahren beziehungsweise eine autonome Kolonnenfahrt zu ermöglichen, ist die Kommunikation eines Fahrzeugs mit seinem Umfeld jedoch unumgänglich. Solche Systeme sind zunächst darauf angewiesen, dass Informationen aus verschiedensten Quellen zur Verfügung gestellt werden (vgl. Cramer, 2013). Welche Informationen für die Fahrzeugkommunikation sinnvoll erscheinen und wie diese ermittelt werden, wird im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

4.2 Informationserfassung

Bei der Car-to-X-Communication sollen für den Empfänger relevante Informationen übermittelt werden. Vorab müssen diese jedoch erfasst und analysiert werden. Da es sich speziell bei der Car-to-Car-Communication um ein aktuelles Entwicklungsthema der Automobilindustrie handelt (siehe Kapitel 5.5), ist über den Inhalt der zu übermittelnden Informationen noch wenig bekannt. Daher werden in diesem Kapitel auch eigene Überlegungen ausgeführt, welche Informationen bei der Fahrzeugkommunikation z.B. in Bezug auf eine Steigerung der Verkehrssicherheit wichtig erscheinen.

4.2.1 Informationserfassung mittels Fahrzeugsensorik

In heutigen Fahrzeugen wird mithilfe von Sensoren verschiedenster Bauart eine Vielzahl an Informationen ermittelt, die in Steuergeräten verarbeitet und zwischen diesen mittels eines Steuergerätenetzwerks (z.B. CAN-Bus) übertragen werden. Im Steuergerät des Fahrdynamikreglers ESC wird der fahrdynamische Zustand des Fahrzeugs ermittelt und dieser stabil eingeregelt. Hierfür kommen fünf verschiedene Sensortypen zum Einsatz:

- Raddrehzahlsensoren an allen Rädern
- Lenkradwinkelsensor zur Erfassung des Fahrerwunsches
- Gierratensensor zur Erfassung der Drehbewegung des Fahrzeugs um dessen Hochachse
- Beschleunigungssensoren für die Längs- und Querrichtung
- Bremsdrucksensoren zur Ermittlung des radindividuellen Bremsdrucks.

Weitere Informationen erhält der Fahrdynamikregler über die anderen im CAN-Bus befindlichen Subsysteme, beispielsweise von der Motor- und Getriebesteuerung. In Bezug auf das Senden relevanter Informationen an andere Verkehrsteilnehmer lassen sich im Fahrdynamikregler beispielsweise Werte zu Fahrgeschwindigkeit, Reifenschlupf und Beschleunigung abgreifen (vgl. Bosch, 2007).

Die aktuelle Fahrgeschwindigkeit kann für einen Vergleich mit der Fahrgeschwindigkeit auf freier Strecke herangezogen werden. Bei entsprechend großer Abweichung erfolgt eine Warnung an nachfolgende Verkehrsteilnehmer vor stockendem Verkehr beziehungsweise vor Stau. Verbunden mit Informationen zur aktuellen Position kann somit ein Stauende relativ genau lokalisiert werden. Eine abrupte Geschwindigkeitsreduzierung gibt zudem auch Hinweise auf eine mögliche Gefahrenstelle (z.B. Gegenstand auf der Fahrbahn).

Aus dem Reifenschlupf lassen sich Informationen zur aktuellen Oberflächenbeschaffenheit der Straße generieren. Vergrößerte Schlupfwerte deuten z.B. auf Schnee oder Eis hin. Unter Berücksichtigung des Außentemperatursignals lassen sich diese Werte verifizieren. Mit einer Meldung zu Straßenglätte können nachfolgende Fahrzeuge rechtzeitig gewarnt werden. Zudem besteht die Möglichkeit über die Car-to-Infrastructure-Communication die Straßenmeisterei zu erreichen und auf entsprechende Gefahrenstellen aufmerksam zu machen. Ungewöhnlich große Schlupfwerte bei Temperaturen über dem Gefrierpunkt in Verbindung mit dem Signal des Scheibenwischers oder eines Regensensors lassen Rückschlüsse auf Aquaplaning zu. Ferner können eingeschaltete Nebelscheinwerfer und Nebelschlussleuchten Informationen zu aktuellen Sichtbedingungen geben.

Je nach Art der erfassten Information muss festgelegt sein, wann eine Nachricht an die anderen Verkehrsteilnehmer gesendet wird. So ist beispielsweise ein einzelnes langsames Fahrzeug mit eingeschalteten Nebelscheinwerfern kein eindeutiges Indiz auf schlechte Sichtverhältnisse auf einem bestimmten Streckenabschnitt, währenddessen eine Benachrichtigung über eine Notbremsung eines einzelnen vorausfahrenden Fahrzeugs bereits sinnvoll sein kann.

Die im vorangehenden Abschnitt erwähnten Größen zur Informationsgewinnung liegen in heutigen Fahrzeugen als Signale im CAN-Bus und in den entsprechenden Steuergeräten vor. Sie müssen dort abgegriffen werden, so dass je nach Relevanz Meldungen für andere Verkehrsteilnehmer oder die Infrastruktur generiert werden können.

Darüber hinaus verfügen Fahrzeuge, die mit verschiedenen Fahrerassistenzsystemen zur Längs- und Querführung ausgestattet sind, über weitere Möglichkeiten Informationen zu erfassen. Die Sensorik erlaubt eine Überwachung des Fahrzeugumfelds, woraus Abstände und Relativgeschwindigkeiten zu anderen Verkehrsteilnehmern ermittelt werden, siehe auch Kapitel 2 und 3. Hierbei ist es denkbar, Rückschlüsse auf den aktuellen Verkehrszustand zu ziehen und diesen an die Verkehrszentrale oder Navigationssysteme anderer Fahrzeuge zu melden. Des Weiteren erlaubt die Überwachung

und Analyse des Verkehrsraums vor dem Fahrzeug frühzeitig Unregelmäßigkeiten oder Veränderungen im Verkehrsablauf zu erkennen und an andere Verkehrsteilnehmer zu melden, die diese Stelle erst kurz darauf erreichen werden. So kann beispielsweise vorab auf Geschwindigkeitsbegrenzungen hingewiesen werden, sodass nachfolgende informierte Fahrzeuge ihre Geschwindigkeit energieeffizient mittels Schubabschaltung reduzieren können.

4.2.2 Informationserfassung mittels Fahrzeugnavigation

Navigationsgeräte fanden in den vergangenen Jahren eine immer größere Verbreitung. Bei Pkw-Neufahrzeugen beträgt die Ausstattungsquote mit festeingebauten Navigationssystemen etwa 45 %[3]. Hinzu kommt eine Vielzahl portabler Navigationsgeräte, wobei sich hier speziell Smartphones einer immer größeren Beliebtheit erfreuen. Durch einen eingebauten GPS-Empfänger (Global Positioning System) und entsprechende Softwarelösungen erfüllen sie ebenfalls die Aufgaben eines Navigationssystems. Alle angesprochenen Systeme erfüllen die Funktionen Ortung, Zielauswahl, Routenberechnung und Zielführung (vgl. Bosch, 2007).

Abbildung 21: Festeinbaunavigation (BMW, 2013a), Smartphone mit Navigationssoftware (TomTom, 2013a), portables Navigationsgerät (Navigon, 2013).

Der Fokus dieses Kapitels liegt hauptsächlich auf der Beschreibung der Ortungsfunktion, da sie dafür verantwortlich ist, dass beispielsweise Gefahrenstellen (Unfall, liegengebliebenes Fahrzeug, Glätte, siehe auch Kapitel 4.2.1) lokalisiert werden können. So können die Informationen, die mit der fahrzeugseitigen Sensorik erfasst werden, mit einer exakten Positionsangabe an nachfolgende Fahrzeuge weitergegeben werden. Im Hinblick auf die autonome Kolonnenfahrt und die damit verbundenen geringen Fahrzeugfolgeabstände ist eine umfassende Kenntnis über mögliche Gefahrenstellen und unerwartete Ereignisse besonders sinnvoll, um die Geschwindigkeit der Kolonne rechtzeitig in einer harmonischen Art und Weise anpassen zu können. Des Weiteren spielt die Positionsbestimmung bei der Kolonnenbildung und beim Auffinden einer Fahrzeugkolonne eine wesentliche Rolle, siehe Kapitel 9.1.1und 9.1.2.

[3] Auswertung der zum Verkauf angebotenen Pkw bei autoscout24.de mit Erstzulassung in den Jahren 2011 bis 2013; Datenbasis: 313322 Angebote; Tag der Auswertung: 27.04.2013

4.2.2.1 Positionsbestimmung

Die Erläuterungen zur Bestimmung der Position eines Fahrzeugs lehnen sich an die Ausführungen in Bosch (2007) und Reif (2010b) an. Die Positionsbestimmung von Navigationssystemen erfolgt heute in der Regel über das Satellitenortungssystem GPS. Eine Positionsbestimmung mittels GPS ist weltweit möglich. 24 zusammenwirkende Satelliten bilden hierfür ein Netz und umkreisen die Erde in etwa 20.000 km Höhe auf sechs verschiedenen Umlaufbahnen, siehe Abbildung 22. Ein Umlauf eines Satelliten um die Erde dauert 12 Stunden. Die Satelliten sind derart über den Horizont verteilt, dass an jedem Punkt der Erde stets mindestens vier Satelliten sichtbar sind. Jeder Satellit sendet dabei 50-mal pro Sekunde Positions-, Identifikations- und hochgenaue Zeitsignale aus. Die gesendeten Signale treffen bei einem GPS-Empfänger auf der Erdoberfläche aufgrund der unterschiedlichen Laufzeiten zeitversetzt ein. Mit den gesendeten Informationen und dem Zeitversatz wird mithilfe des Trilaterationsverfahrens die Position des Empfängers berechnet.

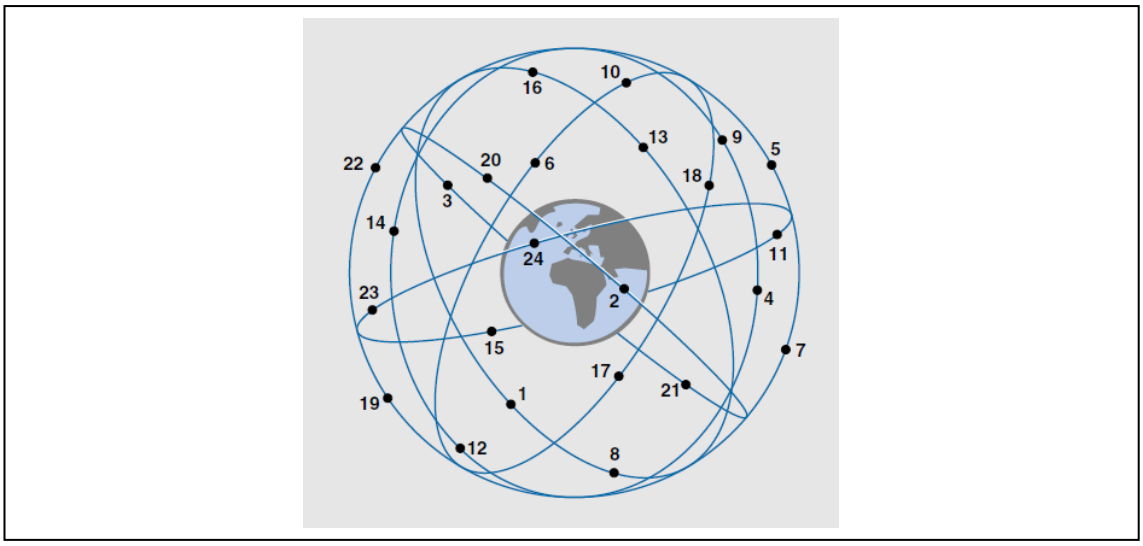


Abbildung 22: Satellitenortungssystem GPS. (Reif, 2010b; S. 193)

Abbildung 23 zeigt dieses Vorgehen in einer vereinfachten zweidimensionalen Darstellung. Die Position der Satelliten und die gemessen Laufzeiten t_1 und t_2 sind bekannt. Die Schnittpunkte A und B der beiden Kreise sind mögliche Positionen des Empfängers. Aus Plausibilitätsgründen resultiert Punkt A als Position des GPS-Empfängers.

In der Realität bewegen sich Erde und Satelliten jedoch in einem dreidimensionalen Raum, sodass für eine zweidimensionale Positionsbestimmung (geographische Länge und Breite) drei Satellitensignale benötigt werden. Die Genauigkeit beträgt hierbei etwa 3 bis 5 m. Werden vier Satellitensignale empfangen, ist die dreidimensionale Positionsbestimmung möglich. Die Genauigkeit bei der Höhenbestimmung bewegt sich im Bereich von 10 bis 20 m.

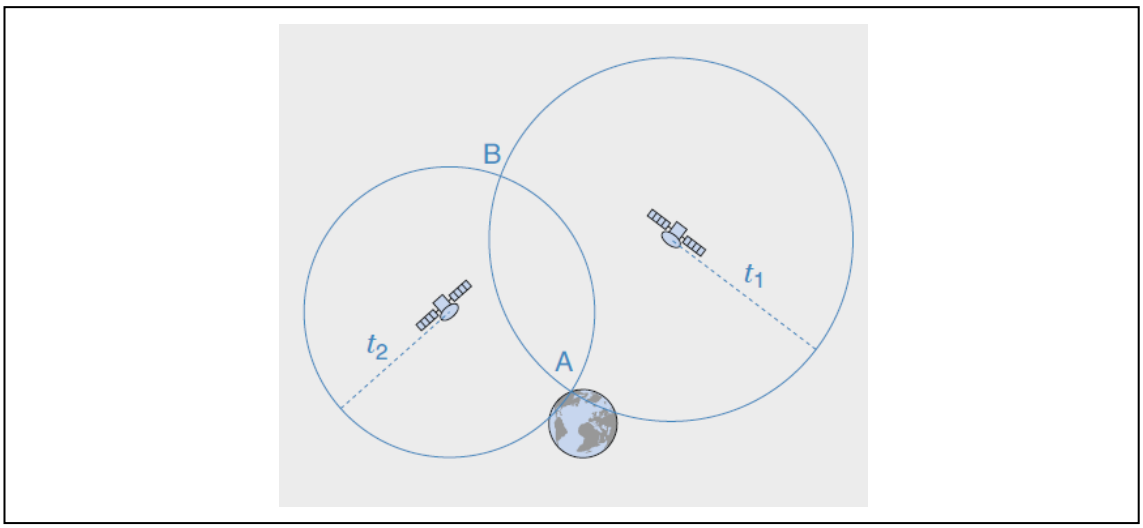


Abbildung 23: Positionsbestimmung mithilfe von GPS. (Reif, 2010b; S. 194)

Enge Täler, Häuserschluchten oder Tunnel führen zu einer negativen Beeinflussung der Empfangsqualität. Während portable Navigationssysteme ausschließlich auf das GPS-Signal angewiesen sind, erlauben fest verbaute Navigationssysteme eine Koppelortung, bei der zusätzlich die Fahrzeugsensorik zur Positionsbestimmung herangezogen wird. Mithilfe des Geschwindigkeitssignals und den Daten aus dem Drehratensensor, der Richtungsänderungen erfasst, lässt sich die Fahrzeugbewegung auch bei eingeschränkter GPS-Verfügbarkeit berechnen. Die absolute Fahrtrichtung muss jedoch zuvor einmal aus den GPS-Signalen bestimmt worden sein. Ein Start der Navigation in einem Tunnel ist folglich nicht möglich.

Die Fahrtrichtung kann aus dem Vergleich zweier aufeinanderfolgender Positionsdaten ermittelt werden. Bei kleinen Geschwindigkeiten führt diese Methode aufgrund der Ungenauigkeit in der Positionsbestimmung rasch zu inakzeptablen Fehlern. Bereits ab Geschwindigkeiten von 30 km/h liefert eine weitere Methode, die den Dopplereffekt ausnutzt, bessere Ergebnisse. Bei Bewegung des Fahrzeugs entstehen unterschiedliche Empfangsfrequenzen des Satellitensignals, siehe Abbildung 24.

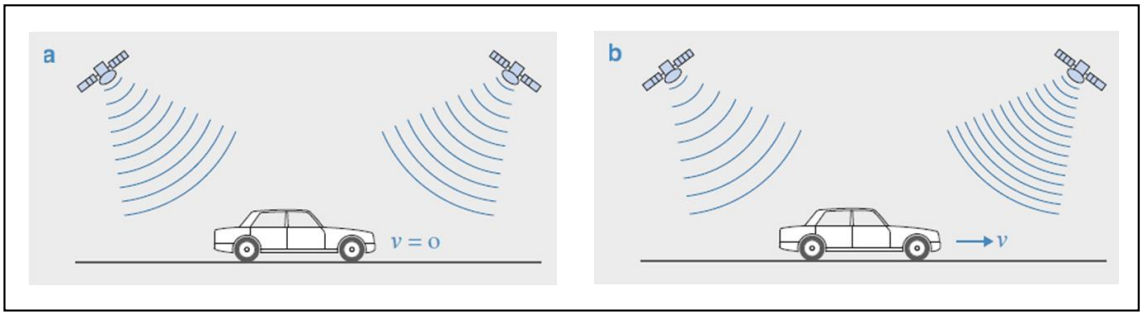


Abbildung 24: Dopplereffekt. (Reif, 2010b; S. 195)

Fährt ein Empfängerfahrzeug dem ausgestrahlten Signal eines Satelliten entgegen, sieht es eine höhere Frequenz als die Frequenz mit der die Satelliten ihre Signale aus-

senden. Im Gegenzug nimmt der Empfänger eine geringere Frequenz wahr, wenn er sich von einem Satelliten und dessen ausgestrahlten Signal entfernt.

Um auch bei Ortungsungenauigkeiten infolge schlechter Empfangsbedingungen oder sich aufsummierender Fehler aus der Koppelortung die Fahrzeugposition ermitteln zu können, wird die berechnete Ortungsposition mit dem Straßenverlauf der im Speicher hinterlegten Straßenkarte verglichen. Mit diesem sogenannten „Map Matching“ können die aktuelle Position in der Karte dargestellt und Fahrempfehlungen am gewünschten Ort ausgegeben werden.

Abbildung 25 zeigt zusammenfassend die Komponenten eines Navigationssystems und macht nochmals deutlich, welche Signale und Daten auf die Positionsbestimmung einwirken. Da portable Navigationssysteme nicht auf fahrzeugseitige Sensordaten zurückgreifen, ergeben sich bei schwierigen Empfangsbedingungen Defizite bei der exakten Bestimmung der Fahrzeugposition.

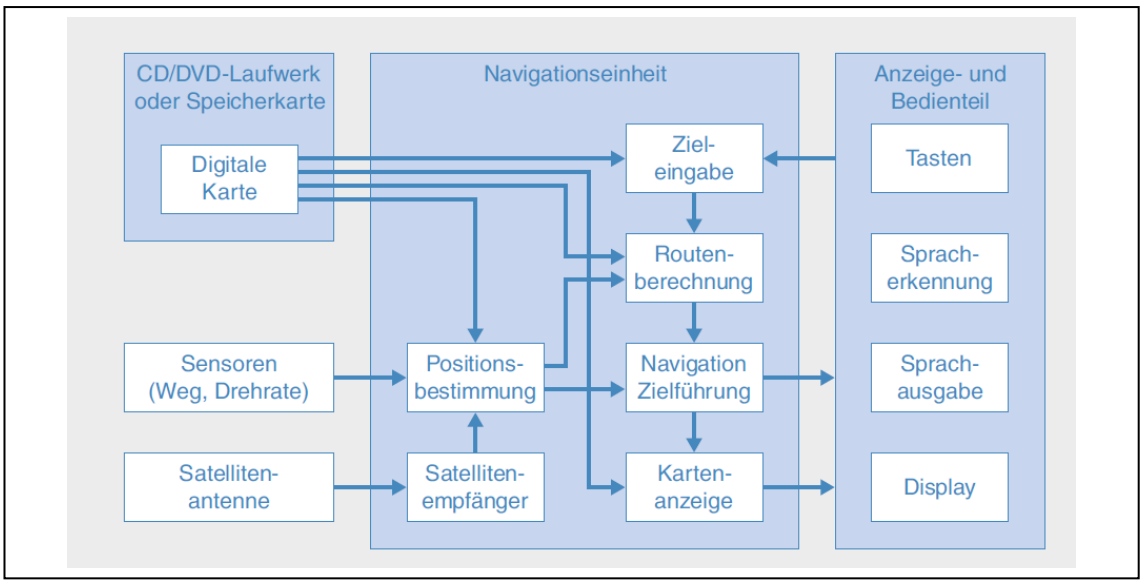


Abbildung 25: Komponenten eines Navigationssystems. (Reif, 2010b; S. 191)

Um zukünftig die Positionsbestimmung bei nicht fest im Fahrzeug verbauten Systemen auch in Tunneln, engen Tälern und Häuserschluchten zu verbessern, sind Lösungen notwendig, die einen Datenaustausch zwischen Fahrzeug und Navigationssystem ermöglichen. Für die Fahrzeugkommunikation ist es speziell in Bezug auf die Fahrsicherheit relevant, dass Positionen möglicher Gefahrenstellen genau lokalisiert werden können oder dass bei der Kolonnenbildung andere Kolonnenteilnehmer zuverlässig gefunden werden – möglichst auch ohne ein festeingebautes Navigationssystem. BMW bietet beispielsweise eine vollintegrierte Navigationsfunktion für Smartphones an, die die Zielführung mithilfe einer „ausgeklügelten Positionierungstechnologie“ (BMW Link, 2011; S. 55) auch in Tunneln aufrechterhalten soll.

4.2.2.2 Wahl der Fahrtroute

Auch die Kenntnis über die gewählten Fahrtrouten der Verkehrsteilnehmer kann für die Fahrzeugkommunikation genutzt werden. Ist der Zielort eines jeden Fahrzeugs bekannt, lässt sich daraus ableiten, wann ein Fahrzeug einen bestimmten Streckenabschnitt passiert und Rückschlüsse auf die voraussichtliche Verkehrsqualität ziehen. Bei Staugefahr können einige Verkehrsteilnehmer auf Alternativrouten umgeleitet werden, noch bevor der Stau entsteht. Auch wenn keine Kenntnis über den Zielort besteht, weil der Fahrer z.B. auf einer bekannten Strecke unterwegs ist, sind Algorithmen denkbar, die diesen aus Erfahrungswerten (z.B. sich täglich wiederholender Weg zur Arbeit) ermitteln.

Vorteilhaft ist bei Kenntnis der Fahrtrouten vor allem, dass Kapazitätsengpässe bereits vorab erkannt werden können und die Möglichkeit besteht, Verkehrsbehinderungen zu vermeiden, ehe diese entstehen. Heute reagieren Navigationssysteme auf übermittelte Verkehrsmeldungen und berechnen unter Umständen eine neue Route, allerdings erst nachdem eine Verkehrsstörung entstanden ist. Zudem werden die Verkehrsbedingungen auf der alternativen Route oft nicht berücksichtigt (vgl. Pudenz, 2011a). Informationen über voraussichtliche Verkehrsstärken ermöglichen es auch einer Verkehrszentrale, Streckenbeeinflussungsanlagen oder Wechselwegweisungen rechtzeitig zu schalten.

Bezüglich der autonomen Kolonnenfahrt kann die Kenntnis über die Fahrtroute anderer Fahrzeuge für die Suche passender Partner genutzt werden. Beispielsweise kann im Umfeld eines Fahrzeugs nach anderen Verkehrsteilnehmern gesucht werden, die eine weitestgehend gleiche Route gewählt haben, um ständig neue Koppelvorgänge zu vermeiden.

4.2.3 Informationserfassung aus Umfeld- und Verkehrsdaten

Informationen für die Kommunikation zwischen Infrastruktureinrichtungen und Fahrzeugen sowie zwischen Fahrzeug und Fahrzeug können auch aus Umfeld- und Verkehrsdaten gewonnen werden.

4.2.3.1 Umfelddaten

Gemäß TLS 2012 (Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen, herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung) dient die Erfassung von Umfelddaten vorwiegend der automatischen Erkennung von Witterungsauswirkungen, die den Verkehrsfluss beeinträchtigen oder die Verkehrssicherheit gefährden. Hierzu gehören reduzierte Fahrbahngriffigkeiten bei Nässe oder Glätte, wie auch

eingeschränkte Sichtweiten oder starke Windeinflüsse. Über Wechselverkehrszeichen oder Verkehrsmeldungen im Rundfunk können Warnungen an die Verkehrsteilnehmer übermittelt und somit ein sicheres und flüssigeres Verkehrsgeschehen erreicht werden (vgl. TLS 2012). Die TLS sieht eine Reihe möglicher Messwerte für die Ermittlung von Umfelddaten vor. Hierzu gehören u.a. Temperaturen (Luft, Fahrbahnoberfläche, Boden), Luftdruck, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit- und -richtung, Sichtweite und Helligkeit, Niederschlagsart- und -intensität, Schneehöhe, Eisdicke oder auch der Restsalzgehalt. Je nach Einsatzzweck und örtlichen Gegebenheiten ist nur ein Teil der Umfelddaten zu ermitteln.

Für die autonome Kolonnenfahrt hilft die Kenntnis der Witterung um beispielsweise die Abstände zwischen den Fahrzeugen anzupassen. So ist es denkbar, bei starker Nässe die Abstände zu vergrößern, um im Falle einer Gefahrenbremsung Auffahrunfälle zu verhindern. Gerade in Bereichen niedriger Fahrbahngriffigkeit spielt die Qualität der Reifen eine wichtige Rolle und es muss sichergestellt sein, dass Kollisionen aufgrund unterschiedlich langer Bremswege vermieden werden. Im Falle stärkerer Beeinträchtigungen, wie sie durch Schnee und Glätte auftreten können, kann eine Kolonnenauflösung rechtzeitig eingeleitet werden.

Nachteilig ist, dass die ermittelten Daten nur stationär für den Ort der Messung gelten. Speziell bei lokal auftretenden Nebelfeldern kann es hier zu Diskrepanzen kommen. Anfang und Ende eines Streckenabschnitts mit erhöhtem Gefahrenpotential lassen sich nicht so exakt bestimmen, wie dies bei der Auswertung von Fahrzeugdaten denkbar ist.

4.2.3.2 Verkehrsdaten

Daten zum aktuellen Verkehrszustand können auf verschiedene Arten ermittelt und generiert werden. In diesem Kapitel sollen einige Möglichkeiten kurz vorgestellt werden, die es erlauben, Rückschlüsse auf den Verkehrszustand auf einem Streckenabschnitt zu ziehen. Die Erfassung von Verkehrsdaten dient unter anderem der kurzfristigen Verkehrsbeeinflussung, der Steuerung von Wechselwegweisungsanalgen und der Straßenzustandsinformation, die über verschiedene Medien verbreitet wird (vgl. Listl, 2003). Fahrzeuge, die autonomes Fahren oder die Teilnahme an der autonomen Kolonnenfahrt erlauben, können sich bei entsprechender Kenntnis rechtzeitig auf den neuen Verkehrszustand einstellen und abrupte Fahrmanöver vermeiden. Fahrzeuge, die über die Möglichkeit zur Kolonnenteilnahme verfügen, diese aber bisher nicht nutzen, können zu einem Kolonnenbeitritt aufgefordert werden. Die aus der Kolonnenfahrt resultierenden Kapazitätssteigerungen können die Staubildung verzögern oder gegebenenfalls ganz vermeiden, siehe Kapitel 10.1. Liegen die Informationen zum aktuellen Verkehrszustand vor, ist es auch möglich, durch individuelle Nachrichtenübermittlung einzelne Fahrzeuge umzuleiten, um staugefährdete Bereiche zu entlasten.

Eine konventionelle Methode zur Erhebung von Verkehrsdaten stellt die Verwendung ortsfester Messstellen dar. Nach Ausführungen von Listl (2003) werden dabei meist Induktionsschleifendetektoren verwendet. Da an einem bestimmten Querschnitt über eine gewisse Zeitdauer gemessen wird, spricht man von einer lokalen Messung. Bei Überfahrt des Detektors wird jedes Fahrzeug erfasst, woraus sich die Verkehrsstärke in [Fz/h] ermitteln lässt. Zudem ist die Bestimmung der lokalen Geschwindigkeit möglich. Zwischen den Messstellen müssen die Verkehrsdaten interpoliert werden.

Darüber hinaus ist die fahrzeugseitige Erfassung des Bewegungsablaufs sowie die Videobeobachtung eines Streckenabschnitts mit automatischer Bildverarbeitung möglich (vgl. Listl, 2003). Aufgrund der großen Verbreitung an Mobilfunkgeräten und den aktuellen Entwicklungen, fahrzeugseitig generierte Daten mit anderen Verkehrsteilnehmern zu teilen, soll an dieser Stelle kurz auf die Nutzung von „Floating Phone Data“ und „Floating Car Data“ eingegangen werden.

Floating Phone Data

Bei Floating Phone Data (FPD) erfolgt die Verkehrsdatenerfassung durch die Ortung von Mobilfunkgeräten. Dabei wird auf die Kommunikationsdaten zwischen Basisstationen und Mobilfunkstationen zurückgegriffen. Diese Daten müssen ausgewertet und analysiert werden, um verkehrsrelevante Daten zu generieren. Während eines Gespräches liegen detaillierte Informationen zur Empfangsstärke und zur aktiven Funkzelle vor, sodass eine gute Lokalisierung möglich ist. Im Stand-by-Modus kann jedoch nur der Wechsel einer „Location Area“, bestehend aus 30 bis 40 Funkzellen, bestimmt werden (vgl. Schlaich, 2005). Gemäß den Ausführungen von Schlaich (2005) erfolgt die Auswertung in zwei iterativ durchzuführenden Schritten. Zunächst müssen die Mobilfunkteilnehmer über intelligente Algorithmen gefiltert werden, die am Verkehrsgeschehen auf der Straße teilnehmen. In einem weiteren Schritt findet das sogenannte „Map Matching“ statt, wie es ebenfalls bei Navigationsgeräten angewandt wird, siehe auch Kapitel 4.2.2.1. Dabei werden die mit Ungenauigkeiten behafteten Positionen der Mobilfunkteilnehmer den auf einer digitalen Karte hinterlegten Straßenzügen zugeordnet. Schlaich (2005) beschreibt, dass besonders die genauen Ortungsinformationen während eines Gesprächs für die Verkehrslageerfassung relevant sind. Aus ihnen lassen sich Geschwindigkeiten ableiten und damit die aktuelle Verkehrslage bestimmen. Da bei der Verwendung von Floating Phone Data ohnehin vorhandene Informationen bei den Netzbetreibern abgegriffen werden, entstehen bei diesem Verfahren nur geringe Kosten.

Floating Car Data

Im Gegensatz dazu müssen bei der Verwendung von Floating Car Data (FCD) Fahrzeuge mit Ortungsgeräten und Datenübertragungseinheiten (Mobilfunk) ausgestattet werden, was einen weitaus größeren Aufwand bedeutet. Zudem entstehen Kosten infolge des Datenverkehrs zwischen Fahrzeug und Empfangszentrale (vgl. Schlaich, 2005). Nach Angaben von Treiber und Kesting (2010) können detailreichste Verkehrs-

informationen bereitgestellt werden, wenn die Trajektoriendaten aller Verkehrsteilnehmer bekannt sind. Messfahrzeuge werden als mobile Sensoren eingesetzt, die den Geschwindigkeitsverlauf aufzeichnen und diesen mit den aktuellen GPS-Koordinaten verknüpfen. Alternativ ist auch die Ortsbestimmung durch Integration des Geschwindigkeitssignals möglich. Heute sind sowohl festeingebaute als auch portable Navigationssysteme verfügbar, die die aktuelle Fahrzeugposition anonymisiert an den Hersteller übertragen. Aus der daraus abgeleiteten Information über die Fahrgeschwindigkeit kann der Verkehrszustand abgeschätzt und somit bei Bedarf die Routenführung angepasst werden. Bei Floating Car Data können auch weitere, fahrzeugseitig ermittelte Informationen (siehe Kapitel 4.2.1) gesendet werden, sodass beispielsweise auch Informationen zur Witterung an einem bestimmten Streckenabschnitt mitgeteilt werden. Dies ermöglicht eine deutlich höhere Qualität bei der Ermittlung von Verkehrsdaten. In dem Fall, dass neben Geschwindigkeit und aktueller Position weitere Daten gesendet werden, spricht man von XFCD (Extended Floating Car Data).

Um den maximalen Nutzen aus den auf unterschiedliche Art und Weise ermittelten Informationen für die Bestimmung der Verkehrslage zu ziehen, kann eine Datenfusion durchgeführt werden, die Daten aus unterschiedlichen Quellen, wie auch Meldungen durch die Polizei, berücksichtigt (vgl. Treiber und Kesting, 2010).

5 Fahrzeugkommunikation

Das vorangegangene Kapitel 4.2 hat gezeigt, welche Informationen für eine Kommunikation der Verkehrsteilnehmer untereinander und mit der Infrastruktur relevant sein können. Mit dem Ziel, den Verkehrsfluss und damit verbunden den Fahrkomfort und die Verkehrssicherheit zu steigern ergibt sich der Bedarf, diese Informationen zu teilen. Speziell vor dem Hintergrund des autonomen Fahrens und der autonomen Kolonnenfahrt müssen ständig und möglichst frühzeitig Informationen an andere Fahrzeuge übermittelt werden. In diesem Kapitel sollen daher verschiedene Übertragungswege für Informationen aus dem Fahrzeug heraus und in das Fahrzeug hinein vorgestellt werden. Dabei handelt es sich sowohl um heute in Serie befindliche Systeme (z.B. Übertragung von Verkehrsmeldungen) als auch um Systeme zur Car-to-X-Communication, wie sie aktuell entwickelt werden.

5.1 Definition Fahrzeugkommunikation

Nach German (2007) lassen sich bei der Fahrzeugkommunikation zwei Bereiche unterscheiden: die Intra-Fahrzeugkommunikation und die Inter-Fahrzeugkommunikation. Die Intra-Fahrzeugkommunikation bezieht sich dabei auf den Austausch von Daten innerhalb des Fahrzeugs. Kommunikationsbussysteme gehören in heutigen Fahrzeugen zum Standard und ermöglichen die Übermittlung von Signalen zwischen Steuergeräten, Sensoren und Aktuatoren (vgl. Reif, 2010b). Die Inter-Fahrzeugkommunikation bezeichnet die Kommunikation des Fahrzeugs mit der Umwelt. Dabei kann es sich einerseits um „klassische“ Kommunikation handeln, bei der Fahrzeuge Nachrichten empfangen, oder aber um bidirektionale Kommunikation (vgl. German, 2007). Bei der klassischen Kommunikation ist das Fahrzeug beispielsweise Empfänger von GPS-Signalen oder von mit dem Radiosignal ausgestrahlten Verkehrsmeldungen. Die bidirektionale Kommunikation ergibt sich aus der Weiterentwicklung der Fahrerassistenzsysteme mit dem Ziel des autonomen Fahrens und dem Wunsch, Daten mit anderen Fahrzeugen oder der Infrastruktur zu teilen (vgl. Reif, 2010b). Die Inter-Fahrzeugkommunikation umfasst somit die Car-to-Car-Communication (C2CC) als auch die Car-to-Infrastructure-Communication (C2IC). Zusammenfassend wird auch die Bezeichnung Car-to-X-Communication (C2XC) verwendet (vgl. Reif, 2010b). Für die Kommunikation zwischen Fahrzeug und stationären Infrastruktureinrichtungen in Straßennähe wird zum Teil auch der Begriff „Car-to-Roadside“ verwendet. Bei den vorgestellten Begriffen wird meist nicht unterschieden, ob das Fahrzeug eine Nachricht an die Infrastruktur sendet oder ob die Infrastruktur Informationen an das Fahrzeug übermittelt (vgl. Plößl, 2008).

Im Rahmen dieser Ausarbeitung werden einige Ausprägungen der Inter-Fahrzeugkommunikation vorgestellt. Ist dabei von Fahrzeugkommunikation die Rede, so ist darunter stets die Inter-Fahrzeugkommunikation zu verstehen.

5.2 Anwendungsmöglichkeiten

Aus der Kommunikation zwischen Fahrzeugen beziehungsweise zwischen Fahrzeugen und der Infrastruktur ergibt sich eine Vielzahl an Möglichkeiten zur schnellen und gezielten Gefahrenwarnung. Darüber hinaus lassen sich verschiedenste Komfortfunktionen, zu denen u.a. die autonome Kolonnenfahrt gehört, implementieren. Einige Beispiele für Komforfunktionen und einige beispielhafte Gefahrensituationen sollen an dieser Stelle aufgeführt werden (vgl. Reif (2010b), German (2007) und Gajek (2011)):

- Warnung vor Stauende
- Warnung vor Nässe, Glätte oder Nebel
- Warnung vor Personen und Tieren im Bereich der Fahrbahn
- Warnung vor Einsatzfahrzeugen (Rettungsgasse bilden)
- Automatische Notrufsysteme
- Mitteilung der exakten Position einer Wanderbaustelle
- Verkehrseffizienz (Verkehrsinformation, Verkehrslenkung)
- Verbrauchseffizienz (optimierter Verkehrsfluss, harmonisierte Geschwindigkeit)
- Ferndiagnose/Wartung durch Werkstätten
- Kommunikation mit Lichtsignalanlagen/Bahnschranken
- Parkraumbezahlung
- Frühzeitiges Erkennen sich nähernder Fahrzeuge an Kreuzungen.

5.3 Übertragung von Verkehrsmeldungen

Die stark zunehmende Zahl an Kraftfahrzeugen in den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts, verbunden mit einer Verlagerung des Güterverkehrs von der Schiene auf die Straße, führte insbesondere auf Autobahnen erstmals zu Stauproblemen. Selbst der Ausbau des Straßennetzes konnte der wachsenden Nachfrage nach Straßenraum nicht nachkommen. Im selben Jahrzehnt begann man, Verkehrsmeldungen im Radio zu senden. Zunächst beschränkte man sich auf wöchentliche Berichte und Vorhersagen, steigerte die Häufigkeit der Verkehrsnachrichten jedoch zügig. Heute werden Verkehrsnachrichten üblicherweise im 30-Minuten-Takt gesendet, zu den Hauptverkehrszeiten am Morgen zum Teil alle 15 Minuten. Bei dringenden Verkehrsmeldungen wie Warnungen vor Falschfahrern oder Kindern im Fahrbahnbereich wird das Radioprogramm auch direkt unterbrochen (vgl. Winner et al., 2012). Die Tendenz der steigenden Übertragungshäufigkeit von Verkehrsnachrichten zeigt, dass die Entwicklung in Richtung Echtzeit-Verkehrsmeldungen geht. In diesem Kapitel soll daher auf die heute verfügbare Technik der Fahrzeugkommunikation in Bezug auf den Übertragungsstandard von Verkehrsmeldungen und auf die immer häufiger verbreiteten Echtzeitsysteme eingegangen werden.

Zur Übertragung der Verkehrsmeldungen wird auf Systeme der Verkehrstelematik zurückgegriffen. Diese umfassen meist einen stationären Dienste-Server zur Verbreitung und Übertragung von Daten, ein mobiles Endgerät zum Empfang der Daten und einen lokalen Rechner im Endgerät, der die Informationen für den Nutzer aufbereitet oder auch Daten an den stationären Server zurück überträgt. Die Übertragung der Daten ist über Rundfunk- oder Mobilfunk-basierte Technologien möglich. Bei Nutzung des Übertragungswegs via Rundfunk wird eine Vielzahl von Nutzern mit Informationen versorgt. Die Nachrichtenübermittlung erfolgt hierbei unidirektional und nicht individuell auf den einzelnen Nutzer zugeschnitten. Der Übertragungsweg via Mobilfunk ermöglicht es, Informationen individuell für den jeweiligen Nutzer aufzubereiten. Da der Empfänger von Nachrichten gleichzeitig auch ein Absender sein kann, ist die Kommunikation in diesem Fall als bidirektional zu bezeichnen (vgl. Winner et al., 2012).

5.3.1 Universelle Nachrichtenübermittlung

Für die universelle Nachrichtenübermittlung, bei der Verkehrsmeldungen allen Verkehrsteilnehmern via Rundfunk zur Verfügung gestellt werden, gibt es verschiedene Übertragungsstandards, die in diesem Kapitel vorgestellt werden sollen. Zudem wird eine Bewertung der Übertragungswege für die Nutzungsmöglichkeiten im Zusammenhang mit der autonomen Kolonnenfahrt vorgenommen.

Das herkömmliche und meist verwendete FM-Rundfunksignal (Ultrakurzwelle) beinhaltet in digitaler Form codierte Verkehrsnachrichten. Hierfür wird der im Radio Data System (RDS) inkludierte Traffic Message Channel (TMC) verwendet. Der RDS-Datenkanal erlaubt Übertragungsraten von ca. 100 Bit/s (vgl. Reif, 2010b).

Nach Reif (2010b) ist die Standardisierung von Meldungsinhalten Grundlage für Systeme, die sich im Markt etablieren sollen. Die Standardisierung erlaubt es, Inhalte aus verschiedenen Quellen von Endgeräten auswerten zu können. Im Bereich der Übertragung von Verkehrsnachrichten wird auf den sogenannten Alert-C-Standard zurückgegriffen. Verkehrsstörungen werden dabei durch ihre Art (u.a. Stau, Vollsperrung), ihre Ursache (u.a. Unfall, Glätte), ihre voraussichtliche Dauer und die Identifikation des Straßenabschnitts charakterisiert. Für Autobahnstreckenabschnitte, Autobahnanschlussstellen und Knotenpunkte, wichtige Kreuzungen im Bundesstraßennetz sowie geographische Regionen existieren hierfür numerische Codierungen. Nachteilig ist, dass bisher nur Hauptverkehrswege wie Autobahnen und größere Bundesstraßen durch die Codierung erfasst sind.

Abbildung 26 zeigt die Datenübermittlung und Datenauswertung mittels RDS-TMC schematisch auf. Das vom Radiosender ausgestrahlte Signal setzt sich aus dem Unterhaltungs- und Informationsprogramm sowie den Inhalten aus dem Verkehrsfunkstudio zusammen. Im Fahrzeug wird das Signal im RDS-Modul wieder in einen Audiokanal und einen digitalen Datenstrom aufgeteilt. Der digitale Datenstrom wird anschlie-

ßend vom Autoradio oder auch vom portablen Navigationsgerät decodiert und bei entsprechendem Funktionsumfang intern für spätere Abfragen gespeichert. Einige Geräte bieten die Möglichkeit, Verkehrsmeldungen akustisch wiederzugeben. Durch die standardisierte Codierung ist eine Sprachausgabe in verschiedenen Sprachen möglich. Die mit RDS-TMC übertragenen Informationen können vom Navigationsgerät ausgewertet und der Prüfung unterzogen werden, ob sie den geplanten Routenverlauf beeinflussen. Bei einer Beeinflussung wird die Route unter Berücksichtigung der Verkehrsstörung neu berechnet und entschieden, ob eine günstigere Alternativroute vorliegt. Der Fahrer wird im Falle einer Verkehrsmeldung akustisch und über eine Meldung im Anzeigegerät informiert.

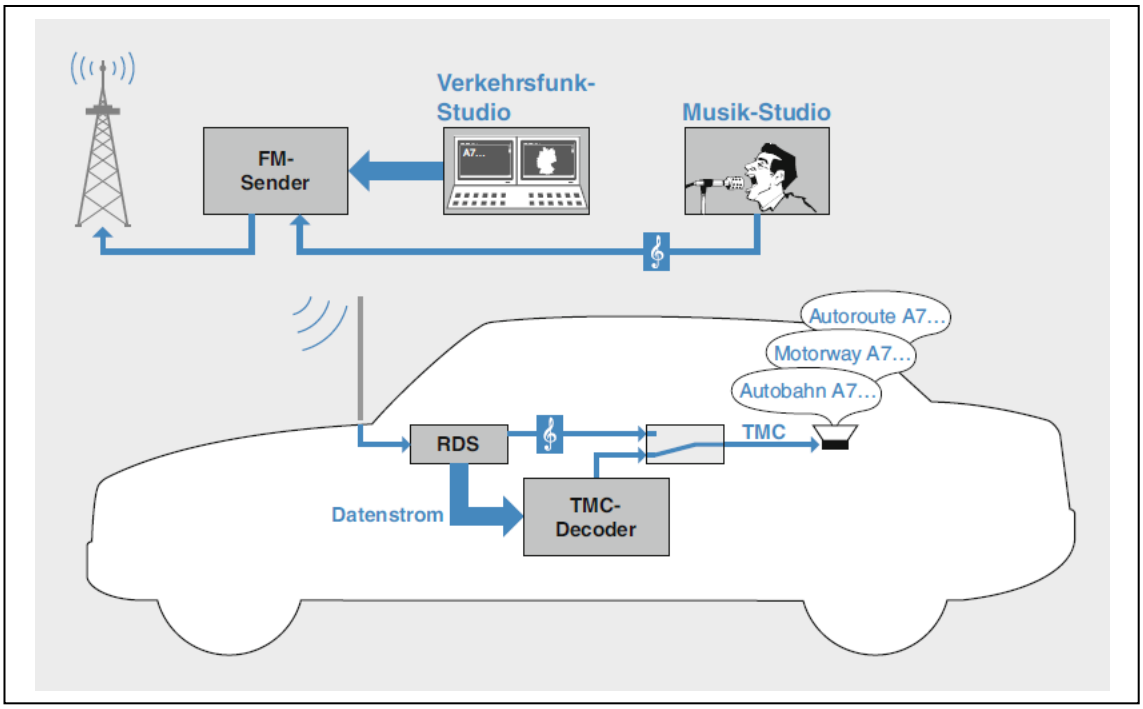


Abbildung 26: Datenübermittlung und Datenauswertung mit RDS-TMC. (Reif, 2010b; S. 200)

Verkehrsstörungen auf Streckenabschnitten, die nicht über die Codierung erfasst sind, können durch die gesprochenen Verkehrsmeldungen im Radioprogramm übermittelt werden, wobei in diesem Fall die Bewertung des Störungseinflusses in der Regel durch den Fahrer erfolgt.

RDS-TMC bietet aufgrund einiger Systembeschränkungen wie die begrenzte Übertragungsrate oder der vordefinierten Codierung, die sich auf das Hauptverkehrswegenetz beschränkt, Möglichkeiten zur Optimierung. In Bezug auf autonomes Fahren oder die autonome Kolonnenfahrt bietet dieses System kaum Nutzungsmöglichkeiten, da das Straßennetz durch die vordefinierte Codierung zu grob aufgelöst ist und Verkehrsstörungen oder Gefahrenstellen erst mit Verspätung gemeldet werden.

Nach Reif (2010b) ist derzeit ein Verfahren in der Entwicklung, bei dem nicht mehr auf vordefinierte Codes zurückgegriffen werden muss und Dynamisierungsmöglichkeiten somit auch auf innerstädtischen Straßen und kleineren Nebenstraßen gegeben sein sollen. Der sogenannte TPEG-Standard (Transportation Protocol Experts Group) wird neben ausführlichen Verkehrsmeldungen u.a. auch Informationen zu Parkständen und einen Wetterservice beinhalten (vgl. IRT, 2013). Die Möglichkeit hierfür schafft die Übertragung via DAB (Digital Audio Broadcasting, digitaler Übertragungsstandard für den Empfang von Digitalradio) mit einer Datenrate von bis zu 1,5 Mbit/s oder aber über WLAN (vgl. Winner et al., 2012). Für die Verkehrsinformation erlaubt es TPEG, jeden Verkehrspunkt in einer digitalen Karte genau zu lokalisieren und Verkehrsereignisse detaillierter zu beschreiben (vgl. IRT, 2013). Während TMC die Lokalisierung eines Staus nur über die nahegelegenen Autobahnanschlussstellen definieren kann, können die Position und Länge des Staus mit TPEG exakter bestimmt werden. Die ARD strahlt TPEG inzwischen aus und es wird erwartet, dass noch im Jahr 2013 erste Navigationsgeräte angeboten werden, die diese Daten verarbeiten können (vgl. Möbius, 2013). Um Verkehrsmeldungen detailliert und mit genauen Ortsangaben zu übertragen, bietet TPEG bereits eine gute Möglichkeit, um Informationen in das Fahrzeug zu bringen und Verkehrsteilnehmer gezielt warnen zu können. Jedoch ist eine hohe Datenaktualität sicherzustellen.

TMC Pro ist ein weiterer Dienst zur Übermittlung von Verkehrsmeldungen, der sich in verschiedenen Eigenschaften von TMC unterscheidet. Während TMC von öffentlich-rechtlichen Rundfunkanstalten ausgestrahlt wird, übernehmen private Rundfunksender die Ausstrahlung von TMC Pro. Zudem basieren die Verkehrsmeldungen des konventionellen TMC auf Informationen von Polizei, ADAC, Staufliegern und weiteren Quellen. Anschließend werden die Informationen in Verkehrszentralen aufbereitet. TMC Pro erhält Informationen aus automatischen Datensensoren sowie aus speziell ausgerüsteten Messfahrzeugen (Floating Cars), bereitet diese bei der Gesellschaft für Verkehrsdaten mbH auf und prüft sie auf Plausibilität. Die weitestgehend automatische Auswertung ermöglicht es, Verkehrsmeldungen sehr viel schneller zu verbreiten, Stauenden genauer zu lokalisieren und mithilfe vorliegender historischer Daten Stauprognosen zu geben (vgl. Connect (2009) und Röbke-Doerr (2006)). TMC Pro erlaubt es, Verkehrsteilnehmer zeitnah über Störungen zu informieren, jedoch wird nicht das gesamte Straßennetz erfasst und die Datenübertragungsraten im Rahmen des Rundfunksignals sind auch hier begrenzt. Da in Gefahrensituationen jedoch häufig eine sofortige Warnung gesendet werden muss, ist eine Nutzung dieses Informationssystems in der beschriebenen Form für autonome Fahrzeuge oder autonome Kolonnenfahrten ebenfalls nicht geeignet.

5.3.2 Individuelle Nachrichtenübermittlung

Durch die Nutzung von Floating Phone Data (vgl. Kapitel 4.2.3.2) lassen sich detaillierte Verkehrsinformationen auch für Straßen erfassen, die bisher nicht mit TMC Pro abgedeckt werden. Für die Verkehrslageerfassung nutzt man die statistische Erfahrung, dass im Stau stehende Verkehrsteilnehmer oft zum Handy greifen um z.B. Freunde oder Geschäftspartner über die Verspätung zu informieren (vgl. Connect, 2008). Während des Telefonats oder des Absendens einer SMS ist eine Lokalisierung und eine Bestimmung der aktuellen Fahrgeschwindigkeit möglich, siehe Abbildung 27.

Abbildung 27: Funktionsprinzip für die individuelle Nachrichtenübermittlung. (CB, 2009)

Wie im vorangegangenen Kapitel erläutert wurde, reichen die Übertragungsraten im Rahmen des Rundfunksignals jedoch nicht aus, um Verkehrsinformationen zu übermitteln, die sowohl die Hauptverkehrs- als auch die Nebenstraßen erfassen. Aus diesem Grund gewinnt die Übertragung via Mobilfunk an Interesse (vgl. Connect, 2009).

Verschiedene Hersteller von portablen Navigationsgeräten (z.B. TomTom, Navigon), verschiedene Automobilhersteller (z.B. BMW, Audi) oder auch Anbieter von Smartphone Betriebssystemen (z.B. Google) bieten Navigationssysteme an, die eine dynami-

sche Routenführung auf Basis Mobilfunk-übermittelter Informationen erlauben. Der Aufbau und die Funktionsweise der Systeme sind meist ähnlich. In den Geräten beziehungsweise Fahrzeugen verbaute SIM-Karten liefern Informationen über die Geschwindigkeiten auf einem bestimmten Streckenabschnitt an eine Zentrale. Dort werden die erfassten Daten mit den Verkehrsmeldungen der Polizei, Sensordaten von Autobahnen und Bundesstraßen, verfügbaren Informationen aus Floating Car Data und zum Teil kommunalen Verkehrsleitsystemen verknüpft (vgl. Pudenz, 2011a). Eine Bündelung verschiedenster Quellen wird als wichtiger Baustein für eine umfassende Verkehrslageerfassung, die eine dynamische sowie intelligente Routenführung erst möglich macht, angesehen (vgl. Connect, 2008).

Die so erfasste Verkehrslage kann via Mobilfunk an das Fahrzeug oder Navigationsgerät übermittelt und als Grafik dargestellt werden, siehe Abbildung 28. In diesem Fall geben die Farben grün (keine Verkehrsstörung), gelb (zähfließend), orange (stop&go) und rot (Stau) Auskunft über den aktuellen Verkehrszustand.

Abbildung 28: Optische Darstellung der Verkehrslage bei Echtzeitsystemen. (BMW, 2013b)

Da die Verkehrslage ständig erfasst wird und die Informationen zeitnah weitergegeben werden, bezeichnen die Anbieter ihre Systeme als Echtzeitsysteme. In der Regel erfolgt eine aktualisierte Verkehrsinformation alle zwei bis drei Minuten (vgl. Pudenz (2011a) und TomTom (2013b)). Durch die Nutzung des Mobilfunknetzes entstehen Kosten, wobei oft ein jährlicher Datenvertrag abgeschlossen werden muss. Beim Kauf eines Neuwagens, der mit einem entsprechenden System ausgestattet ist, sind die ersten Nutzungsjahre jedoch meist kostenlos.

Die zur Verfügung stehende Bandbreite bei der Datenübertragung via Mobilfunk ermöglicht es, den Verkehrszustand deutlich exakter als bei RDS-TMC darzustellen. Ist bei aktiver Zielführung eine Verkehrsstörung auf der gewählten Route ermittelt worden, berechnet das System aus den zur Verfügung stehenden Informationen die Zeitverzögerung. Gleichzeitig ist die Verkehrslage auf den Nebenstraßen und möglichen Umlei-

tungsstrecken bekannt, sodass bei Bedarf gezielte Umleitungsempfehlungen gegeben werden können, siehe Abbildung 29.

Abbildung 29: Darstellung von Umleitungsempfehlungen bei Echtzeitsystemen. (BMW, 2013b)

Da die Verkehrsmeldungen laufend aktualisiert werden und Umleitungsempfehlungen von der eigenen aktuellen Position abhängen, kann die Nachrichtenübermittlung in das Fahrzeug beziehungsweise zum Fahrer als individuell bezeichnet werden. Nach Breitenberger et al. (2006) können fahrzeugseitig erfasste Sensordaten ebenfalls über das Mobilfunknetz übermittelt und zur Bestimmung der Verkehrslage herangezogen werden. Die Übertragungsmöglichkeiten sind bei Fahrzeugen und festeingebauten Navigationssystemen, die mit SIM-Karten und Mobilfunkmodulen ausgestattet sind, gegeben. In Bezug auf das autonome Fahren oder die autonome Kolonnenfahrt bedeutet dies, dass relevante Ereignisse von vorausfahrenden Fahrzeugen gemeldet und nachfolgende Fahrzeuge gewarnt werden können. Geht man dabei von einer Geschwindigkeit von 120 km/h und einer Aktualisierung der Verkehrsdaten im 2-Minuten-Takt aus, so wird ein Bereich erfasst, der mindestens 0 bis 4 km vor dem Fahrzeug liegt. Bei der derzeitigen Aktualisierungsrate sind Gefahrenmeldungen wie beispielsweise eine Vollbremsung eines direkt vorausfahrenden Fahrzeugs noch nicht rechtzeitig übermittelbar. Die Aktualisierungsfrequenz könnte für gezielte Warnungen sicher gesteigert werden, jedoch entstehen bei jeder Nutzung des Mobilfunknetzes Kosten und je nach Ausprägung des Fahrzeugkommunikationssystems können sehr große Datenmengen anfallen. Für eine kleinräumigere Kommunikation muss daher ein anderer Übertragungsweg genutzt werden, der in Kapitel 5.5 beschrieben wird.

5.4 Automatische Notrufsysteme

Im September 2011 beschloss die Europäische Kommission, dass ab 2015 zugelassene Pkw mit einem sogenannten eCall-System (Kurzform für „emergency call“) ausge-

rüstet werden sollen. Ziel des Systems ist es, Rettungskräfte schneller zu alarmieren und somit Verletzten besser und früher helfen zu können. Da das System automatisch Nachrichten generiert und diese an die Infrastruktur sendet, soll es an dieser Stelle kurz vorgestellt werden.

Sobald die Fahrzeugsensorik einen schweren Unfall feststellt, wird eCall automatisch aktiviert und ermöglicht es, die Rettungskräfte auch dann zu informieren, wenn die Fahrzeuginsassen nicht mehr in der Lage sind, einen Notruf abzusetzen, siehe Abbildung 30. Ein manuelles Auslösen des eCalls durch Drücken einer Notruftaste ist jedoch auch möglich. Das System wählt dann die Nummer der Notrufzentrale 112. Dabei wird zunächst versucht, eine Sprachverbindung zu den Fahrzeuginsassen herzustellen. Gleichzeitig wird der Notrufzentrale ein Datensatz mit Minimalinformationen zu Unfallzeitpunkt, Unfallkoordinaten, Fahrtrichtung (wichtig bei Autobahnen), Fahrzeugidentifikation und zu einigen weiteren Aspekten übermittelt.

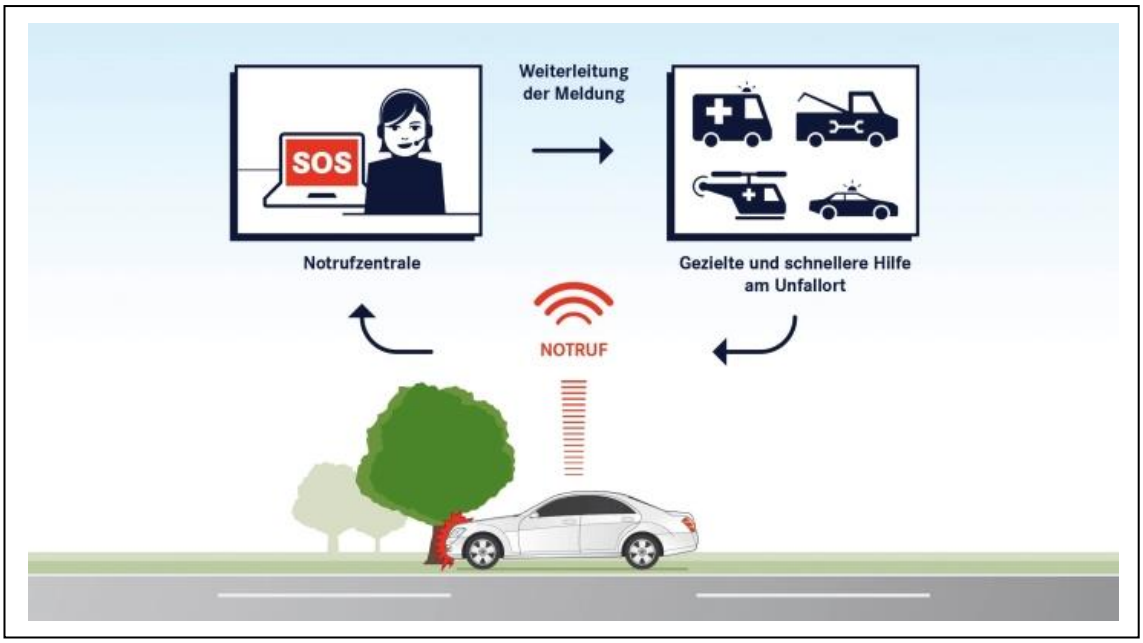


Abbildung 30: Automatisches Notrufsystems. (Mercedes-Benz-Notrufsystem, 2012; S. 78)

In Stadtgebieten soll die Zeitspanne bis zum Eintreffen der Helfer mithilfe von eCall um bis zu 40 % und in ländlichen Gebieten um bis zu 50 % reduziert werden können. Es wird davon ausgegangen, dass durch rechtzeitige Hilfeleistungen die Verletzungsschwere von Zehntausenden pro Jahr reduziert werden kann und mehrere hundert Leben pro Jahr EU-weit gerettet werden können. Zudem ermöglicht eine schnelle Alarmierung der Rettungskräfte eine frühzeitigere Räumung der Unfallstelle, was wiederum zu verkürzten Staus und einer verringerten Gefahr von Folgeunfällen führt. Letztendlich ergeben sich durch verkürzte Stauzeiten und somit verringerten Kraftstoffbedarf sowie eine geringere Belastung des Gesundheitssystems auch volkswirtschaftliche Vorteile.

Die Kosten eines eCall-Systems werden auf weniger als 100 Euro pro Neuwagen geschätzt. Mobilfunkbetreiber müssen eCall-Anrufe vorrangig weiterleiten und dürfen keine Gebühren hierfür erheben. Das eCall-System ist gemäß den nationalen Datenschutzbeauftragten der EU-Gruppe datenschutzrechtlich unbedenklich, da ein Notruf entweder manuell oder erst im Falle eines Unfalls automatisch eingeleitet wird. Es ist daher nicht möglich, den Weg eines Fahrzeugs nachzuverfolgen (vgl. Haub (2012) und Europäische Kommission (2011)).

Um einen automatischen Notruf absetzen zu können, müssen verschiedene technische Voraussetzungen im Fahrzeug gegeben sein (vgl. ADAC, 2013). Für die Ermittlung der Fahrzeugposition ist ein GPS-Empfänger unumgänglich. Zudem werden eine Mobilfunkeinheit und eine dazugehörige Antenne zum Senden der Daten benötigt. Für den Aufbau einer Sprachverbindung müssen ein Mikrofon und Lautsprecher verbaut sein. Zudem benötigt es eine Taste für das manuelle Auslösen des Notrufs. Da bei einem schweren Unfall die Batterie oder die Stromversorgung zerstört werden kann, ist ferner sicherzustellen, dass eine Notstromversorgung das Senden des eCalls ermöglicht. Beschleunigungssensoren für die Erkennung eines Unfalls sind heute Standard in allen Fahrzeugen.

Neben den oben genannten Minimalinformationen, werden zum Teil auch heute schon umfangreichere Nachrichten mit Zusatzinformationen generiert. Es können beispielsweise nähere Informationen zu Aufprallwucht und -richtung übermittelt werden. Zudem erlaubt die Fahrzeugsensorik das Erkennen von Überschlagunfällen. Aus Erfahrungswerten lassen sich Verletzungsausmaßprognosen ableiten. Dies ermöglicht, angemessene Rettungsmaßnahmen einzuleiten und gegebenenfalls sofort einen Rettungshubschrauber zu verständigen. Die Anzahl der Insassen ist über die Sitzbelegung oder die Anzahl der eingerasteten Sicherheitsgurte bestimmbar (vgl. Euro NCAP, 2010)

Unabhängig von der gesetzlichen Regelung werden intelligente Notrufsysteme bereits seit 2007 (BMW) angeboten. Die Zahl der Fahrzeughersteller, die ein solches System anbieten, wächst zwar inzwischen jährlich (Ford, Mercedes-Benz, PSA, Volvo), jedoch waren im September 2011 erst 0,7 Prozent aller Pkw in der EU mit einem solchen Notrufsystem ausgestattet (vgl. Europäischen Kommission, 2011). Die bisher sehr geringe Verbreitung ist zum einen auf die geringe Zahl der Anbieter zurückzuführen, zum anderen ist das Notrufsystem, wie es derzeit von den Herstellern angeboten wird, an das Vorhandensein von Navigationssystemen und Freisprecheinrichtungen gekoppelt. Im Unterschied zum Notrufsystem „eCall“, das stets eine Verbindung zur Notrufzentrale 112 herstellt, werden bei den bisher erhältlichen Systemen Verbindungen zu herstellereigenen Call-Centern aufgebaut, die die übermittelten Informationen anschließend an die Rettungsdienste weiterleiten (vgl. Euro NCAP, 2010).

Der Aufbau des beschriebenen eCall-Systems eignet sich theoretisch auch für die Nutzung weiterer Dienste. Statt einer weitestgehend auf der Auswertung der Crash-Sensoren basierenden Nachricht, ist es vorstellbar, ebenfalls andere von der Fahr-

zeugsensorik erkannte Ereignisse situationsbezogen zu übermitteln. Beispielsweise können Glätte, Aquaplaning oder aber mit modernen Systemen liegengebliebene Fahrzeuge oder Fußgänger im Bereich der Fahrbahn erkannt werden. Erkennt die Fahrzeugsensorik einen solchen Fall, kann dieser analog zum eCall an eine Zentrale übermittelt werden, welche die Informationen wiederum anderen Verkehrsteilnehmern zur Verfügung stellt. Eine autonome Fahrzeugkolonne profitiert – wie alle mit diesem System ausgestattete Fahrzeuge – von diesen Meldungen, da sie ihr erlauben, sich rechtzeitig an gewisse Situationen anzupassen (z.B. Geschwindigkeit verringern, Fahrzeugfolgeabstände vergrößern). Speziell bei Fahrzeugkolonnen spielt eine frühzeitige Informationen eine wichtige Rolle um die Fahrzeugführung des hochautomatisierten Systems im Notfall rechtzeitig an den Fahrer zurückgeben zu können.

Während beim Übermitteln von Verkehrsmeldungen und Notrufen die Informationen weitgehend nur in eine Richtung übertragen werden, wird im nachfolgenden Kapitel auf eine Möglichkeit der Fahrzeugkommunikation eingegangen, bei der ein Fahrzeug sowohl Sender als auch Empfänger von Informationen ist.

5.5 Car-to-X-Communication

Aus der Forderung nach einer erhöhten Verkehrssicherheit und einer effizienteren Nutzung der vorhandenen Straßenkapazität ergibt sich der Bedarf, Nachrichten sowohl zwischen Fahrzeugen als auch zwischen Fahrzeugen und der Infrastruktur auszutauschen (vgl. Plößl, 2008). Ferner könnte sich das Fahren umweltfreundlicher und komfortabler gestalten lassen. Im Jahr 2012 haben sich hierfür mehrere Fahrzeughersteller und Zulieferer auf einen gemeinsamen Kommunikationsstandard festgelegt (vgl. Pudenz, 2012b). In diesem Kapitel soll dieses Kommunikationsverfahren vorgestellt werden, das die Kommunikation zwischen Fahrzeugen als auch zwischen Fahrzeugen und der Infrastruktur in Echtzeit ermöglicht. Dabei werden die Art des Netzwerks sowie die Anforderungen an ein solches System genannt, der Systemaufbau und die Funktionsweise beschrieben und auf die Anforderungen bei der Datensicherheit eingegangen. Das Kapitel schließt mit der Vorstellung eines Forschungsprojektes zur Fahrzeugkommunikation ab, das bis Juni 2013 in Deutschland durchgeführt wurde. Das in diesem Kapitel vorgestellte Kommunikationsverfahren ist beispielsweise auch Grundlage aktueller Forschungsprojekte zur autonomen Kolonnenfahrt und wird daher ausführlicher vorgestellt.

5.5.1 Beschluss des Car-to-Car-Communication-Consortium

Die Teilnehmer des Car-to-Car-Communication-Consortium (C2CCC) haben sich 2012 auf einen gemeinsamen Übertragungsstandard für die Fahrzeugkommunikation geeinigt. Mitglieder des Konsortiums sind sowohl Fahrzeughersteller als auch Zulieferer

und IT-Firmen[4] (vgl. Pudenz (2012b) und Krust (2012)). Die unterzeichnete Absichtserklärung sieht vor, ab 2015 kooperative und intelligente Transportsysteme sowie dazugehörige Dienstleistungen auf den Markt zu bringen. Dies wird als ein entscheidender Schritt zur flächendeckenden Einführung der Car-to-X-Communication angesehen. Nachrichten sollen direkt zwischen Fahrzeugen, aber auch zwischen Fahrzeugen und der Infrastruktur in einem Nahbereich von mehreren hundert Metern ausgetauscht werden. Die Reichweite der Umfelderfassung, die im Zusammenhang mit Fahrerassistenzsystemen zur Längs- und Querführung im Fahrzeug stattfindet, wird durch den Datenaustausch deutlich erweitert, wodurch sich neue Sicherheitsfunktionen in das Fahrzeug integrieren lassen (vgl. Krust, 2012).

Die Basis für die Kommunikation bildet der normierte Standard IEEE 802.11 (Institute of Electrical and Electronics Engineers) für drahtlose Netzwerke bzw. für Wireless Local Area Networks (WLAN). Speziell für den Einsatz in Fahrzeugen wurde im Juli 2010 die Erweiterung IEEE 802.11p geschaffen (vgl. IEEE, 2010). Sie soll als Schnittstelle für Anwendungen in der Fahrzeugkommunikation dienen. Die Nachrichten werden dabei in einem festgelegten Frequenzband im Bereich von 5,9 GHz übermittelt. Innerhalb des Frequenzbandes stehen je nach Verwendungszweck verschiedene Frequenzbereiche zur Verfügung, beispielsweise für die Netzwerkkontrolle und Sicherheitsanwendungen wie auch für unkritische Sicherheitsanwendungen und Verkehrsoptimierung (vgl. C2CCC, 2007). Für die Nachrichtenübermittlung werden zwischen den Fahrzeugen sogenannte Ad-Hoc-Netzwerke (siehe Kapitel 5.5.2) aufgebaut, die im Weiteren auch als VANETs (Vehicular Ad-Hoc-Networks) bezeichnet werden. Dabei kann auf vorinstallierte Netzwerkinfrastruktur am Straßenrand verzichtet werden. Die Datentransferrate beträgt bis zu 27 Mbit/s (vgl. Kosch, 2004). Wie in Heimnetzwerken erfolgt die Datenübertragung zwischen Router und Empfänger kostenfrei (vgl. C2CCC, 2007).

Mit der Festlegung auf einen gemeinsamen Übertragungsstandard wurde das hauptsächliche Ziel, einen herstellerübergreifenden und europaweiten (möglicherweise weltweiten) Standard zu schaffen, erfüllt. Er gibt den Fahrzeugherstellern und Zulieferbetrieben nun die Möglichkeit, auf dieser Basis z.B. aktive Sicherheitssysteme zu entwickeln und Maßnahmen für eine rasche Marktdurchdringung zu erarbeiten.

5.5.2 Nachrichtenübermittlung durch Ad-Hoc-Netzwerke

Gemäß den Absichten des Car-to-Car-Communication-Consortium soll die Fahrzeugkommunikation zukünftig über sogenannte Ad-Hoc-Netzwerke realisiert werden. Im Fall der fahrzeugbezogenen Anwendung bezeichnet ein Ad-Hoc-Netzwerk ein „unabhängiges, sich selbst organisierendes Netz aus mobilen Teilnehmern (Knoten)“ (Plößl, 2008, S. 7). Die Selbstorganisation bedeutet, dass eine Vernetzung der Knoten automatisch

[4] Fahrzeughersteller: Audi, BMW, Daimler, Honda, MAN, Opel, Peugeot, Renault, Volkswagen, Volvo Trucks, Volvo Cars, Ford; Zulieferer: u.a. Bosch, Continental, Denso, Delphi

erfolgt, sobald sich diese in Reichweite befinden. Die Datenübertragung wird über eine Funkverbindung realisiert. Da sich die Knoten ständig und eher zufällig bewegen, unterliegt die Netztopologie ständigen Veränderungen.

Wird eine Nachricht nur einmal gesendet ohne danach weitergeleitet zu werden, so hat die Nachricht einen sogenannten Single-Hop-Charakter. Da jeder Teilnehmer im Netzwerk gleichzeitig Sender und Empfänger sein kann, ergibt sich die Möglichkeit, Nachrichten auch über mehrere Teilnehmer weiterzuverbreiten (Multi-Hop-Charakter) und somit die ursprüngliche Reichweite des Netzwerks zu vergrößern (vgl. Plößl, 2008), siehe auch Abbildung 31.

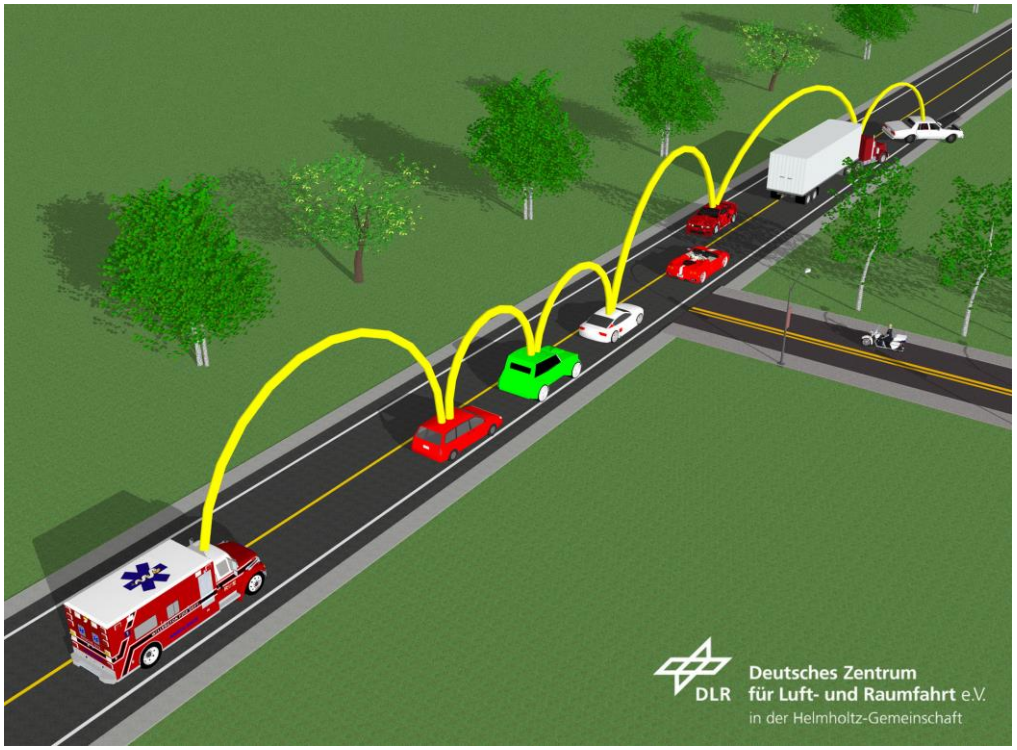


Abbildung 31: Multi-Hop, Nachrichtenübermittlung über mehrere Knoten. (DLR, 2008)

Nach Plößl (2008) charakterisieren sich automobile Ad-Hoc-Netzwerke dadurch, dass die Bewegungen der Knoten (Verkehrsteilnehmer) nicht rein beliebig sind, sondern dass sie sich am Straßenverlauf, an den Verkehrsregeln und an der Interaktion zwischen den Verkehrsteilnehmern orientieren. Da die Bewegungsmöglichkeiten durch den Straßenverlauf vorgegeben sind, können an prekären Stellen (z.B. große Kreuzungen, Unfallschwerpunkte) stationäre Transmitter aufgestellt werden, die auf der einen Seite mit den Verkehrsteilnehmern kommunizieren und auf der anderen Seite Informationen über andere Netze (z.B. Mobilfunk) an Verkehrsleitzentralen weitergeben. Datenübertragungen sind somit direkt zwischen Fahrzeugen (Single-Hop), indirekt zwischen Fahrzeugen (Multi-Hop) sowie zwischen Fahrzeugen und stationären Infrastruktureinrichtungen möglich (vgl. German, 2007).

Kosch (2004) führt aus, dass innerhalb eines Kommunikationsnetzes alle Teilnehmer gleichberechtigt sind und keine Zentrale den Datenverkehr regelt und überwacht. Ein entscheidender Unterschied zwischen Ad-Hoc-Netzwerken und Mobilfunknetzen besteht in ihrer Organisationsstruktur. Mobilfunknetze, die in den vorangehenden Kapiteln die Basis für die Fahrzeugkommunikation bildeten, besitzen einen zellulären Aufbau. Jeder Mobilfunkteilnehmer ist dabei in der Regel seiner nächstgelegenen Basisstation zugeordnet, über welche die gesamte Kommunikation abläuft. Die Struktur der Ad-Hoc-Netzwerke ergibt sich dagegen lediglich aus der aktuellen Position eines Teilnehmers und der Übertragungsreichweite. Es können nur Nachrichten zwischen Teilnehmern übermittelt werden, die geographisch nah beieinander liegen (vgl. Kosch, 2004). Daraus abgeleitet ergibt sich der große Vorteil von Ad-Hoc Netzwerken, „hochaktuell unmittelbar und auf die eigene Situation bezogenen“ (Kosch (2004), S. 2) zu informieren. Abbildung 32 zeigt hierzu ein Fahrzeug in einer Autobahnausfahrt, das eine Gefahrenstelle (z.B. Ölspur) erkannt hat. Diese Meldung wird daraufhin unmittelbar an die anderen Verkehrsteilnehmer, zum Teil per Multi-Hop, weitergeleitet. Fahrzeuge, die ebenfalls diese Autobahnausfahrt nutzen möchten, erhalten eine situationsbezogene Warnmeldung.

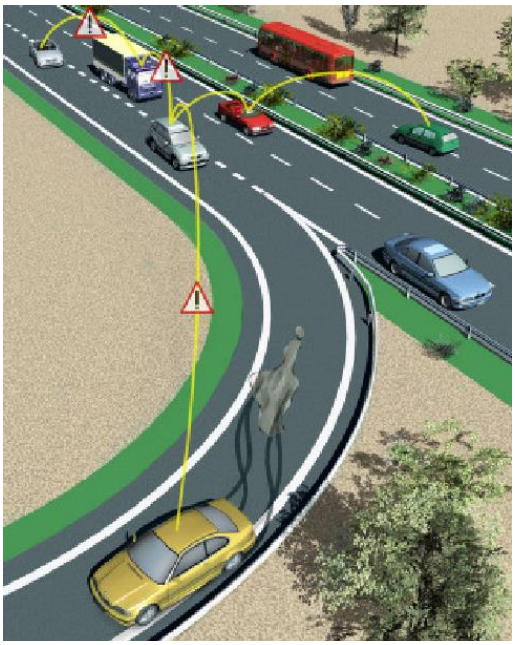


Abbildung 32: Unmittelbare und situationsgerechte Nachrichtenübermittlung. (Kosch, 2004)

5.5.3 Herausforderungen für die Car-to-X-Communication

5.5.3.1 Technische Herausforderungen

Obwohl drahtlose Netzwerkverbindungen im Heim- und Bürogebrauch längst zum Standard gehören und weit entwickelt sind, müssen für den Einsatz im automotiven Massenmarkt verschiedene Herausforderungen gelöst werden, ehe erste Dienste für die Fahrzeugkommunikation zur Verfügung gestellt werden. Winner et al. (2012) nennt für ein Fahrzeugkommunikationssystem folgende Anforderungen:

- Es muss ein gemeinsamer Standard eingeführt werden, der die Kommunikation zwischen Fahrzeugen verschiedener Hersteller und verschiedener Generation ermöglicht.
- Die Verbindungsreichweite soll etwa 1000 m nach vorne und hinten betragen. Zu den Seiten genügen etwa 250 m.
- Die Sendeleistung muss skalierbar sein, da die Anzahl der Teilnehmer im Netz großen Schwankungen unterworfen ist.
- Fahrzeuge bewegen sich zum Teil mit hohen Geschwindigkeiten und sehr hohen Relativgeschwindigkeiten. Der Dopplereffekt muss ausgeglichen werden. Zudem stehen zum Teil nur kurze Zeitspannen für die Datenübertragung zur Verfügung.
- Abschattungen und Reflexionen bzw. Mehrwegeausbreitung im innerstädtischen Verkehr sind zu beachten.
- Bei der Fahrzeugkommunikation werden oft sicherheitsrelevante Meldungen übertragen. Diese müssen unterbrechungsfrei und störsicher übertragen werden können. Zudem ist eine minimale Verzögerungszeit sicherzustellen. Wichtige Nachrichten sind zu priorisieren.
- Um Informationen zielgerichtet übermitteln zu können, müssen geeignete Routingverfahren implementiert werden. Warnmeldungen sollen beispielweise nicht an alle erreichbaren Teilnehmer gesendet werden, sondern nur an diese, die von der Gefahrenstelle beeinflusst werden.

Im Beschluss des Car-to-Car-Communication-Consortium werden diese Anforderungen berücksichtigt und konkretisiert. So soll beispielsweise eine Nachrichtenübermittlung bis zu einer Fahrgeschwindigkeit von 250 km/h sichergestellt sein. Dies entspricht bei entgegenkommenden Fahrzeugen einer Relativgeschwindigkeit von bis zu 500 km/h (vgl. C2CCC, 2007). Neben einer zuverlässigen Verbindung zur Datenübertragung ist auch die Datensicherheit und die Anonymität der Kommunikationsteilnehmer zu gewährleisten, siehe Kapitel 5.5.5.

5.5.3.2 Herausforderung Markteinführung

Die Car-to-X-Communication ist auf eine gewisse Verbreitung im Markt angewiesen, um erste positive Effekte zeigen zu können. Das Car-to-Car-Communication-Consortium (2007) schätzt, dass eine Marktdurchdringung von mindestens 5 % notwendig ist, um zuverlässig Verkehrsinformation weitergeben zu können. Für die Übermittlung von Gefahrenwarnungen wird eine Mindestverbreitungsrate von 10 % genannt. Sobald das System die Marktreife erreicht hat, sieht man sich jedoch mit dem sogenannten Henne-Ei-Problem konfrontiert: Viele potentielle Kunden werden das System beim Fahrzeugkauf nicht bestellen, da sie aufgrund der fehlenden Verbreitung keinen Nutzen haben. Daher gilt es, intelligente Strategien für die Markteinführung zu entwickeln. Ein alternativer und vorübergehender Übertragungsweg via Internet ist für den Zeitraum der Systemeinführung mit geringen Verbreitungsraten denkbar. Auch bei einem optimalen Einführungsszenario, beim dem ab einem gewissen Stichtag alle neuen Fahrzeuge mit der Möglichkeit der Fahrzeugkommunikation ausgestattet werden, rechnet man mit einer Dauer von 18 Monaten bis eine Marktdurchdringung von etwa 10 % erreicht wird. Eine Verbreitungsrate von 50 % erwartet man bei diesem Szenario nach mehr als sechs Jahren. Um die Verbreitung zu beschleunigen sind auch Anreize für die Fahrzeughersteller vorstellbar. Statten sie all ihre Fahrzeuge mit der Funktion zur drahtlosen Nachrichtenübermittlung aus, können sie sich beispielweise ständig über den Fahrzeugzustand informieren oder beim Service wertvolle Zeit sparen, wenn das Fahrzeug automatisch ein Fehlerprotokoll erstellt und übermittelt. (vgl. C2CCC, 2007).

5.5.4 Systembeschreibung der Car-to-X-Communication

Im Folgenden werden die Funktions- und Arbeitsweise sowie einige Nutzungsbeispiele der Car-to-X-Communication vorgestellt, wie sie nach den Ausarbeitungen des Car-to-Car-Communication-Consortium in den nächsten Jahren umgesetzt werden sollen (vgl. C2CCC, 2007).

Die Teilnehmer an der Car-to-X-Communication lassen sich in drei Gruppen einteilen.

- *Fahrzeuge* beziehungsweise ihre Fahrer erhalten Warnmeldungen zu Gefahrenstellen oder Hinweise zum Verkehrsgeschehen.
- *Netzbetreiber* beziehungsweise Straßenverkehrszentralen erhalten aus den gesendeten Informationen der Fahrzeuge bessere Verkehrsdaten, die eine effizientere Steuerung des Verkehrs ermöglichen.
- *Service-Anbieter* mit der technischen Ausstattung um an der Fahrzeugkommunikation teilzunehmen, können ebenfalls Informationen senden und empfangen (z.B. Tankstellen, Werkstätten).

Generell lassen sich bei der Fahrzeugkommunikation auch drei verschiedene Anwendungsszenarien unterscheiden. *Sicherheitsanwendungen*, die beispielsweise vor Straßenglätte oder Gegenständen auf der Fahrbahn warnen, *Verkehrsanwendungen* zur Verbesserung des Verkehrsflusses und zuletzt *Infotainment- oder Serviceanwendungen*.

Sicherheitsanwendungen haben zum Ziel, die aktive Sicherheit zu steigern, d.h. das Entstehen gefährlicher Situationen möglichst vollständig zu vermeiden. Typische Gründe für Auffahrunfälle sind beispielsweise abgelenkte Fahrer oder ein zu geringer Sicherheitsabstand, der ein rechtzeitiges Bremsen nicht mehr möglich macht. Da durch die Fahrzeugkommunikation ständig Daten zu Position, Geschwindigkeit und Fahrtrichtung der Fahrzeuge aus dem eigenen Umfeld vorliegen, kann der Fahrer gewarnt werden, sobald beim vorausfahrenden Fahrzeug starkes Bremsen festgestellt wird. Ein Datenaustausch zwischen Fahrzeugen ist auch denkbar, wenn eine Kollision nicht mehr zu vermeiden ist. In diesem Fall lassen sich Daten zur genauen Fahrzeugposition und zum Fahrzeugtyp austauschen. Mithilfe dieser Informationen können Sicherheitssysteme wie die Gurtvorspannung oder die Airbags vorbereitet und die Sitzlehnen automatisch aufrecht gestellt werden. Gefahrenstellen wie Straßenglätte können beispielsweise durch die Raddrehzahlsensoren erkannt, mit dem Positionssignal verknüpft und an andere Verkehrsteilnehmer gesendet werden. An stationären Transmittern ist dann eine Übertragung an die Straßenmeisterei oder die Verkehrszentrale möglich, um auch dort auf die Gefahrenstelle hinzuweisen.

Die Car-to-X-Communication kann zur Verbesserung des Verkehrsflusses beitragen, indem Fahrzeuge an stationären Transmittern Informationen über den Verkehrsfluss preisgeben. Nach Auswertung dieser Daten in einer Verkehrszentrale kann das Navigationssystem gegebenenfalls eine günstigere Alternativroute anbieten. Innerstädtisch soll die Fahrzeugkommunikation zukünftig die Möglichkeit bieten, mit Lichtsignalanlagen zu kommunizieren und dem Fahrer eine Geschwindigkeit zu empfehlen, mit der er die Lichtsignalanlage während der Freigabezeit erreicht. An Einfahrten mit Einfädelungsstreifen bietet die Fahrzeugkommunikation ebenfalls Möglichkeiten, den Verkehrsfluss zu optimieren. Der ständige Datenaustausch im VANET sorgt dafür, dass die Fahrzeuge auf der Hauptfahrbahn informiert sind, wenn ein weiteres Fahrzeug auf die Hauptfahrbahn einbiegen möchte. Ein rechtzeitiger und gezielter Informationsaustausch kann nun dafür sorgen, dass sich das einbiegende Fahrzeug im Verkehrsfluss einordnen kann, ohne dass große Geschwindigkeitsänderungen aufgrund plötzlicher Bremsmanöver notwendig werden.

In Bezug auf Infotainment oder Serviceanwendungen ist es möglich, eine Internetverbindung über stationäre Transmitter aufzubauen. Um diese zu erreichen, müssen Nachrichten jedoch oft per Multi-Hop übermittelt werden. Eine weitere Anwendungsmöglichkeit ist der sogenannte „Point of interest“-Service (POI). Lokale Geschäfte, touristische Attraktionen oder auch Werkstätten und Tankstellen können mit stationären Transmittern ausgestattet werden, um an der Fahrzeugkommunikation zu partizipieren.

© VuV 2013

Sie senden beispielsweise Öffnungszeiten, Spritpreise oder sonstige Informationen in das Fahrzeug, welches jedoch über Filtermöglichkeiten verfügen muss, um den Fahrer nicht mit ungewünschten Informationen zu belästigen. Es kann aber auch vorteilhaft sein, wenn er automatisch über nahegelegene Tankstellen und deren aktuelle Spritpreise informiert wird, sobald sein Fahrzeug eine gewisse Restreichweite unterschreitet. VANETs ermöglichen darüber hinaus Wartezeiten und Kosten in Werkstätten zu reduzieren. Anstatt ein Diagnosegerät anzuschließen oder Kabelverbindungen mit einem lokalen Computer herzustellen, können Fehlerprotokolle und Softwareupdates drahtlos und zügig übermittelt werden (vgl. C2CCC, 2007). In Bezug auf die Serviceanwendungen sind auch automatische Bezahlsysteme für Parkstände und Mautstrecken denkbar (vgl. Plößl, 2008).

Die Car-to-Car-Communication baut auf einer festgelegten Datenstruktur auf. Speziell für die Sicherheits- und Verkehrsanwendungen muss dabei eine Mindestmenge an Informationsdaten im Fahrzeug vorliegen. Hierzu gehören Positionsdaten, die Fahrzeuggeschwindigkeit und die Fahrtrichtung. Darüber hinaus können Warnmeldungen spezifiziert werden, wenn Informationen zur Stärke der Abbremsung, Informationen aus den ABS- und ESP-Steuerungen sowie Informationen vom Scheibenwischer oder vom Regensensor vorliegen (vgl. C2CCC, 2007).

Für das Senden von Nachrichten gibt es laut Plößl (2008) zwei Möglichkeiten. Ein passives Telematiksystem sendet Nachrichten in regelmäßigen Abständen, während ein aktives Telematiksystem nur dann Meldungen versendet, wenn ein Problem erkannt wurde. Bei der Car-to-X-Communication sollen beide Systeme zum Einsatz kommen.

Bei passiven Systemen senden die Fahrzeuge in regelmäßigen Abständen Informationen zur aktuellen Position und Fahrtrichtung, zur Geschwindigkeit und zur Beschleunigung sowie zur Sendezeit und zu ihrer Identität. Dieses Informationspaket wird mit allen in Reichweite befindlichen Netzteilnehmern geteilt und nicht weitergeleitet (Single-Hop). Mit diesen Informationen ist beispielweise eine „Communication-based Adaptive Cruise Control“ realisierbar. Anders als beim konventionellen ACC (siehe Kapitel 2.1.1) ist hier nicht nur der direkt Vorausfahrende beobachtbar, sondern eine aggregierte Sicht über mehrere Fahrzeuge hinweg möglich. Dies begünstigt frühere Reaktionen auf Geschwindigkeitsänderungen und eine Harmonisierung des Verkehrsflusses (vgl. Plößl, 2008). Eine weitere Möglichkeit für die Verwendung dieser regelmäßig gesendeten Informationen ist die autonome Kolonnenfahrt. Das übermittelte Informationspaket kann die Informationen aus der Umfelderfassung ergänzen und im Falle eines Systemfehlers kurzfristig als redundanter Datenkanal dienen, um die Geschwindigkeiten der Kolonnenfahrzeuge zu koordinieren. Nach Plößl (2008) kann durch die Kopplung der Fahrzeuge der Verkehrsfluss optimiert werden. Gleichzeitig sorgen die geringen Fahrzeugfolgeabstände für Windschatteneffekte und einen reduzierten Kraftstoffverbrauch. Darüber hinaus erhöht die Kolonnenfahrt die Verkehrssicherheit, da die Fahrzeuge innerhalb der Kolonne automatisch abbremsen, sobald das vorausfahrende Fahrzeug die Geschwindigkeit verringert. Als Nebeneffekt der geringeren Fahrzeugfolgeabstände

soll sich auch die Kapazität eines Straßenquerschnitts erhöhen (vgl. Plößl (2008) und Kapitel 10.1.1). Die regelmäßig gesendeten Nachrichten bieten die Möglichkeit, Bewegungen anderer Fahrzeuge im Fahrzeugumfeld zu erfassen und Anomalien zu erkennen.

Ein aktives Telematiksystem, das nur dann Nachrichten sendet, wenn eine bestimmte Gefahrensituation erkannt wird, ist darauf angewiesen, Probleme mit hoher Güte zu erkennen. Während ein passives System nur Informationen sendet, die der Empfänger anschließend auswerten muss, sendet ein aktives System sofort eine konkrete Warnung. Potentielle Gefahrenstellen werden entweder von der fahrzeugseitigen Sensorik erkannt oder die Aggregation der Positions- und Geschwindigkeitsdaten aus dem Fahrzeugumfeld deutet auf eine Gefahrenstelle hin. Da Warnmeldungen im Vergleich zu den regelmäßig gemeldeten Informationen sehr selten auftreten, belasten sie die Übertragungskapazität in einem VANET kaum. Aufgrund ihrer Wichtigkeit sind sie jedoch zu priorisieren. Warnungen vor Gefahrenstellen werden in der Regel per Multi-Hop auch an weiter entfernte Verkehrsteilnehmer gesendet, um diese rechtzeitig zu informieren. Die Größe des Bereichs, in dem andere Fahrzeuge benachrichtigt werden, hängt von der Art des Ereignisses ab (vgl. Plößl, 2008).

Zur Weiterentwicklung der beschriebenen Kommunikationstechnologie wurden in den vergangenen Jahren mehrere Forschungsprojekte initiiert. Im Kapitel 5.5.6 wird das Forschungsprojekt sim^{TD} vorgestellt, in dessen Rahmen die Car-to-X-Communication unter Realbedingungen verifiziert wurde.

5.5.5 Übertragungssicherheit und Datenschutz

Reif (2010b) sieht bei der Datensicherheit im Zusammenhang mit der Car-to-X-Communication fünf wesentliche Anforderungen, die es zu erfüllen gilt.

- *Datenintegrität:* Daten, die falsch ermittelt oder verändert wurden, dürfen entweder nicht gesendet werden oder müssen hinterher erkannt und eliminiert werden.
- *Anonymität:* Der Schutz der Privatsphäre muss den rechtlichen Anforderungen entsprechen.
- *Kompatibilität:* Fahrzeuge sind viele Jahre in Benutzung. Daher muss eine Verträglichkeit von Sicherheitsverfahren möglichst über Jahrzehnte sichergestellt sein.
- *Update/Upgrade-Fähigkeit:* Aufgrund der langen Nutzungsdauer von Fahrzeugen sollten Sicherheitsverfahren über die Möglichkeit verfügen, auf den neuesten Stand gebracht zu werden.
- *Echtzeitfähigkeit:* Die Anforderungen an Sicherheitsverfahren machen eine Ver- und Entschlüsselung der Nachrichten unumgänglich. Da Informationen jedoch

in Echtzeit an andere Verkehrsteilnehmer gesendet werden sollen, muss auch das Sicherheitsverfahren in Echtzeit arbeiten.

Eine Verschlüsselung und sichere Datenübermittlung ist zwingend notwendig, da das System ansonsten Angriffsmöglichkeiten bietet und missbraucht werden kann. Plößl (2008) nennt hierfür Beispiele, beginnend bei einer gezielten Umleitung von Fahrzeugen auf eine andere Fahrtroute bis hin zu provozierten Unfällen und den dazugehörigen Folgen.

Für die Kommunikationsteilnehmer spielt die Sicherheit bei der Datenübermittlung eine große Rolle, jedoch hat jede Nutzergruppe unterschiedliche Informations- und Schutzinteressen. Daher ergeben sich bei Betrachtung der Interessen und Bedürfnisse aller Gruppen Schutzkonflikte, für die ein für alle Teilnehmer tragbarer Kompromiss gefunden werden muss (vgl. Plößl, 2008). Gleichzeitig gilt es, einen europaweiten Standard zu schaffen, der die Anforderungen an Anonymität und Sicherheit in ganz Europa sicherstellt.

Der Fahrzeugführer hat ein Interesse daran, anonym unterwegs zu sein. Er möchte die Fahrzeugkommunikation zu seinem Vorteil nutzen und muss sich daher auf die zur Verfügung gestellten Informationen verlassen können. Ein technischer Ansatz für die Sicherstellung der Anonymität sind sich zeitlich ändernde Fahrzeugidentifikationsnummern (vgl. C2CCC, 2007). Die Fahrzeughalter können dagegen u.a. daran interessiert sein, wo sich ihr Fahrzeug befindet und wie es bewegt wird. Die Fahrzeughersteller befinden sich selbst in einem Zielkonflikt. Auf der einen Seite möchten sie viele Informationen zum Zustand eines Fahrzeugs übermittelt bekommen, um sich ankündigende Schäden vermeiden oder bei Mängeln den Eigentümer benachrichtigen zu können. Auf der anderen Seite besteht ein Interesse daran, möglichst wenige Informationen preiszugeben um die eigene Wettbewerbsposition nicht zu schwächen. Für die Verbesserung ihrer Dienste sind Netz- oder Dienstbetreiber an möglichst vielen Informationen über ihre Nutzer interessiert. Dies ermöglicht ihnen personalisierte Angebote anbieten zu können. Zudem möchten sie ausschließen, dass sie von Nutzern betrogen werden. Die Exekutive kann bei der Fahrzeugkommunikation übermittelte Informationen beispielsweise als Kontrolle für die Einhaltung von Geschwindigkeitsbegrenzungen verwenden und somit Gesetzesübertretungen verfolgen (vgl. Plößl, 2008).

5.5.6 Forschungsprojekt sim^{TD}

Im Rahmen der Arbeit des Car-to-Car-Communication-Consortium wurden in den letzten Jahren mehrere Forschungsprojekte initiiert. Bis Juni 2013 wurde die Car-to-X-Communication im Forschungsprojekt sim^{TD} erstmals unter Realbedingungen in einem einjährigen Praxisversuch verifiziert. sim^{TD} steht dabei für „Sichere intelligente Mobilität Testfeld Deutschland“ und ist einer der weltweit größten Feldversuche. Partner von sim^{TD} sind verschiedene Automobilhersteller, Zulieferer, Forschungsinstitute sowie öf-

fentliche Einrichtungen[5]. Wie auch bei anderen vergleichbaren Projekten steht die Erhöhung der Verkehrssicherheit und Steigerung der Leistungsfähigkeit des bestehenden Verkehrsnetzes durch Nutzung der Fahrzeugkommunikation im Vordergrund. Ein weiteres Hauptziel stellt die Verknüpfung von Car-to-X-Funktionen aus den Bereichen Verkehrseffizienz, Fahren und Sicherheit sowie weiteren Diensten dar.

Insgesamt wird anhand einer Versuchsflotte von 120 Pkw sowie drei Motorrädern die Funktionalität, Alltagstauglichkeit und Wirksamkeit der Fahrzeugkommunikation auf Autobahnen, Bundesstraßen und innerstädtischen Routen in und um Frankfurt am Main betrachtet. Neben den 123 mobilen Versuchsträgern, die mit der entsprechenden Kommunikationstechnik ausgestattet sind, gibt es 100 stationäre Sende- und Empfangseinrichtungen im Versuchsgebiet. Die stationären Einrichtungen leiten u.a. Daten an eine Zentrale weiter, um dort die Verkehrslage zu erfassen. Die Versuchsfahrzeuge werden zum Teil von speziell ausgebildeten Fahrern gesteuert. Sie erzeugen bestimmte Verkehrsszenarien, um die Effizienz, Sicherheit und Akzeptanz bestimmter Funktionalitäten wie beispielweise des „elektronischen Bremslichts“ evaluieren zu können.

Im Rahmen von sim^{TD} wurden mehrere Funktionen implementiert, auf die das System reagiert. Unter anderen gehören dazu Baustelleninformation und Hinderniswarnung, Straßenwetter- und Einsatzfahrzeugwarnung sowie ein Ampelphasenassistent, oder auch das zuvor genannte elektronische Bremslicht, das vor Gefahrenbremsungen warnt. Technisch basiert die Kommunikation auf dem vom Car-to-Car-Communication-Consortium beschlossenen WLAN-Standard 802.11p. Um Verbindungslücken innerhalb der Versuchsflotte zu vermeiden, wird das System zur Nachrichtenübermittlung vom Mobilfunk (UMTS) unterstützt.

In der Versuchsphase wurden bis zu 120.000 km pro Woche innerhalb des festgelegten Versuchsgebiets zurückgelegt. Die Auswertung der ermittelten Daten soll zeigen, wie sich das Verhalten von Fahrzeugen ändert, die mit einer Kommunikationstechnologie ausgestattet sind. Hierbei wird speziell der Einfluss auf die Verkehrseffizienz und die Verkehrssicherheit betrachtet. Parallel zu den Versuchsfahrten fanden Fahrversuche im Simulator statt, um die Auswirkungen der Kommunikationsmöglichkeiten auf die Fahrsicherheit unter stets gleichen Rahmenbedingungen prüfen zu können. Laut den Ergebnissen der Auswertung erhöhen die sim^{TD}-Funktionen signifikant die Sicherheit während der Fahrt. Des Weiteren ergeben sich u.a. durch die Vermeidung von Unfällen volkswirtschaftliche Kostenvorteile, siehe Kapitel 10.4. Die C2XC auf WLAN-Basis konnte ihre Tauglichkeit im Praxiseinsatz zeigen. Während die C2CC in einem Ad-hoc-Netzwerk Vorteile in kritischen Fahrsituationen bietet, beispielweise bei einem abrupten Bremsmanöver eines vorausfahrenden Fahrzeugs, eignet sich die Nachrichtenüber-

[5] Fahrzeughersteller: Audi, BMW Group, Daimler, Opel, Volkswagen, Ford; Zulieferer: Bosch, Continental; Netzbetreiber: Deutsche Telekom; weitere Informationen zu Forschungsinstituten, öffentlichen Einrichtungen und Förderern unter http://www.simtd.de/index.dhtml/2651940c343aec52762k/-/deDE/-/CS/-/Konsortium/Loesungspartner (Stand 07.2013)

mittlung via Mobilfunk für nicht-sicherheitskritische Situationen. Die Ergebnisse des Projekts zeigen zudem, dass bereits eine Ausstattungsrate von fünf Prozent zu erkennbaren Verbesserungen im Verkehrsfluss führt. Signifikante Verbesserungen und eine deutliche Reduzierung der Reisezeiten sollen sich bei einer Ausstattungsrate von rund 80 Prozent ergeben (vgl. SimTD (2012, 2013) und Burkert (2013)).

© VuV 2013

6 Forschungsprojekte zum automatisierten Fahren und zur autonomen Kolonnenfahrt

Fahrerassistenzsysteme werden heute nicht mehr isoliert betrachtet, sondern wachsen schrittweise zusammen. Daraus ergeben sich unter Zuhilfenahme intelligenter Umfeldsensorik neue Informations-, Assistenz und Sicherheitsfunktionen. „Die Vision ist das sensitive Auto, das rundum sehen kann“ (Reif (2010b), S. 109), seine Umgebung bewusst wahrnimmt und interpretiert. Das Verständnis für die Fahrsituation basiert auf Informationen aus der Umfeldsensorik (z.B. Radarsensoren, Kamerasysteme), aus Positions- und Navigationsdaten sowie aus Informationen, die durch die Fahrzeugkommunikation übertragen werden (vgl. Reif, 2010b). Aus dem Verständnis für die Fahrsituation können Handlungsstrategien entworfen werden, die ein automatisiertes Fahren möglich machen.

Systeme zum automatisierten Fahren und zur autonomen Kolonnenfahrt werden seit Jahren in diversen Projekten untersucht und weiterentwickelt. Stellvertretend sollen in diesem Kapitel einige Forschungs- und Entwicklungsprojekte vorgestellt werden, die den Weg zum automatisierten Fahren und zur autonomen Kolonnenfahrt aufzeigen und einen allgemeinen Überblick zum aktuellen Entwicklungsstand geben. Neben den Neuerungen und Vorteilen, die diese Systeme mit sich bringen, soll dabei auch auf mögliche Einschränkungen und zukünftige Entwicklungsherausforderungen eingegangen werden. Technisch basieren diese Systeme weitestgehend auf den in den Kapiteln 2 bis 5 beschriebenen Assistenzsystemen und Möglichkeiten zur Umfelderfassung sowie zur Fahrzeugkommunikation. Cramer (2013) betont, dass Systeme zum automatisierten Fahren zunächst für Autobahnen oder für autobahnähnliche Straßen realisiert werden können. Auf Stadt- und Landstraßen treten dagegen mit Fußgängerverkehr, Kreuzungen sowie Gegen- und Querverkehr weitaus komplexere Verkehrssituation auf. Sofern nicht anders erwähnt, beziehen sich die nachfolgenden Ausführungen auf die am jeweiligen Kapitelende angegebenen Quellen.

6.1 Automatisiertes Fahren

Automatisiertes Fahren stellt eine Grundvoraussetzung für die autonome Kolonnenfahrt dar. Dabei ist es nicht relevant, ob es nur darum geht, einem Fahrzeug in dichtem Abstand zu folgen oder als Führungsfahrzeug Geschwindigkeit und Fahrtrichtung selbst festzulegen. In beiden Fällen müssen Fahrzeuge ihr Umfeld zuverlässig beobachten und interpretieren sowie selbständig bremsen, beschleunigen und lenken. Der Fahrer soll dabei den Vorteil genießen, nebenbei andere Tätigkeiten verfolgen zu dürfen oder je nach Wunsch die Fahrzeugsteuerung beispielsweise in Stausituationen an einen Autopiloten übergeben zu können. Darüber hinaus kann das automatisierte Fahren in Zukunft helfen, Mobilität bis ins hohe Alter sicherzustellen (vgl. Herrtwich, 2013).

6.1.1 HAVEit

HAVEit (Highly Automated Vehicles for Intelligent Transport) ist ein von der EU gefördertes Projekt und befasst sich mit der Entwicklung von Konzepten und Technologien zum hochautomatisierten Fahren. Vorrangiges Ziel dabei ist es, den Fahrer zu entlasten, die Anzahl der Unfälle zu verringern und die Umweltbelastung zu senken. Projektpartner sind Fahrzeughersteller, Automobilzulieferer und verschiedene wissenschaftliche Einrichtungen aus ganz Europa[6].

Im Juni 2011 wurde im Rahmen eines Abschlussevents ein Fahrzeug vorgestellt das, mit serienreifen Technologien ausgestattet, hochautomatisiertes Fahren ermöglicht. Ein Co-Piloten-System erlaubt es, die Geschwindigkeit oder den Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug zu regeln sowie die Spur zu halten. Es kommen somit verschiedene bereits heute erhältliche Fahrerassistenzsysteme zur Längs- und Querführung zum Einsatz (siehe auch Kapitel 2). Sensordaten aus der Umfelderfassung werden ausgewertet und intelligent verknüpft. Da auf weitgehend bestehende Systemkomponenten zurückgegriffen wird, zeigt das Projekt, dass hochautomatisiertes Fahren mit vergleichsweise kostengünstiger und verfügbarer Technik realisierbar ist. Die Vorgabe, eine möglichst seriennahe Umsetzung des hochautomatisierten Fahrens zu entwickeln, wurde somit erfüllt.

Das Co-Piloten-System erlaubt verschiedene Betriebsmodi von der einfachen Fahrerunterstützung über das teilautomatisierte Fahren, bei dem beispielsweise ein Abstandregeltempomat im Einsatz ist, bis hin zum hochautomatisierten Fahren, bei dem das Fahrzeug zusätzlich die Lenkfunktion und die Spurhaltung übernimmt. Abbildung 33 zeigt hierzu das Spektrum, innerhalb dessen das vorgestellte Fahrzeug arbeitet.

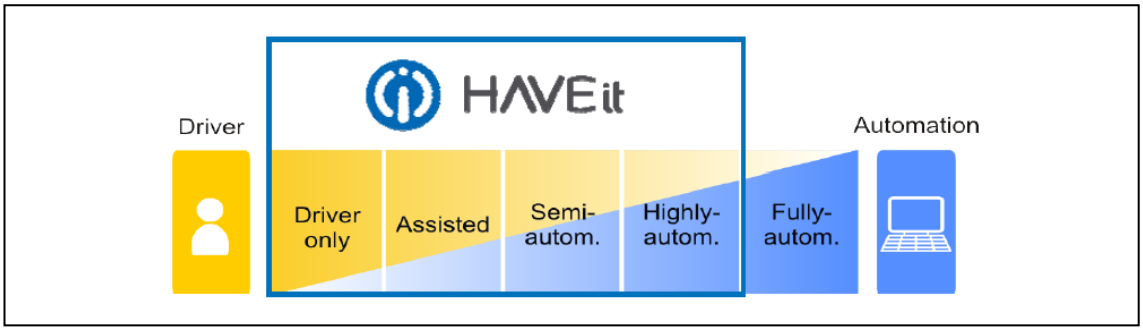


Abbildung 33: Wirkspektrum der verwendeten Technologien. (HAVEit, 2009; S. 5)

[6] Fahrzeughersteller: Volvo Technology AB, Volkswagen AG; Automobilzulieferer: Continental, EFKON AG, Sick AG, Haldex Brake Products AB, Knowllence, Explinovo GmbH; weitere Informationen zu den teilnehmenden Forschungseinrichtungen unter http://www.haveit-eu.org/LH2Uploads/ItemsContent/121/HAVEit_Continental_PM_ArchitectureMigrationDemonstrArch_D_final_20110621.pdf (Stand 18.05.2013)

Da das System kein vollautomatisiertes Fahren unterstützt, verbleibt die Verantwortung beim Fahrer, der die Systeme stets zu überwachen hat. Der Fahrer bleibt somit neben dem Fahrzeug und der Umwelt Teil des Regelkreises und hat stets die Möglichkeit, die automatisiert stattfindende Regeleingriffe durch eigene Eingriffe zu überstimmen. Die Aufmerksamkeit des Fahrers wird dabei ständig mithilfe einer Kamera überwacht. Unter anderem beobachtet sie Blickrichtung und Lidschlag, um daraus auf seine Aufmerksamkeit zu schließen. Sobald das System feststellt, dass sich der Fahrer ablenken lässt oder müde wird, wird ihm die Kontrolle über das Fahrzeug zurückgegeben. Dies ist auch dann der Fall, wenn das hochautomatisierte Fahren beispielweise aufgrund fehlender Fahrbahnmarkierungen nicht mehr möglich sein sollte. Falls keine Reaktion des Fahrers auf die Übergabe (z.B. optische Anzeige, akustische Aufforderung, Vibrationen im Lenkrad) erfolgt, verringert das Fahrzeug seine Geschwindigkeit bis zum Stillstand.

Der vorgestellte Projektstand im Juni 2011 ermöglicht das hochautomatisierte Fahren bei autobahnähnlichen Verkehrssituationen. Bisher nicht realisiert sind Spurwechsel, Hindernisumfahrung oder Notbremsungen. Es wird jedoch davon ausgegangen, diese Herausforderungen mit weiterentwickelter Software und erweiterter Umfelderfassung lösen zu können. Das vorgestellte System soll bis etwa 2016 Serienreife erlangen (vgl. HAVEit, 2011).

6.1.2 Hochautomatisierte Autobahnfahrt

Die BMW Group Forschung und Technik beschäftigt sich in einem eigenen Projekt ebenfalls mit der hochautomatisierten Autobahnfahrt. Der mit umfassender Technik zur Umfelderkennung und mit entsprechender Software ausgestattete Versuchsträger bietet neben den Funktionsumfangsumfängen, wie sie im HAVEit-Projekt implementiert sind (Bremsen, Beschleunigen, Lenken), weitere intelligente Lösungen für die automatisierte Fahrt auf Autobahnen. Ähnliche Projekte befinden sich auch bei weiteren Automobilherstellern in Bearbeitung. Unter anderem erprobt Mercedes-Benz einen innovativen Autobahnpiloten, der im Vergleich zum angesprochenen BMW-Projekt einen sehr ähnlichen Funktionsumfang bietet (vgl. Deppe, 2013).

Im Rahmen des BMW-Projekts stehen das Ausloten der Grenzen und Möglichkeiten von automatisierten Fahrfunktionen sowie das Erforschen zukünftiger Assistenzfunktionen im Vordergrund. Das Ziel einer unmittelbaren und zeitnahen Serieneinführung, wie es beim HAVEit-Projekt verfolgt wurde, spielt hier eine untergeordnete Rolle. Im Gegenzug werden in diesem Projekt bereits neuartige Funktionen in der Praxis erprobt. Das System verfügt beispielweise über die Funktion, langsamere Verkehrsteilnehmer automatisch zu überholen, siehe Abbildung 34. Auch auffahrende Fahrzeuge an Autobahnauffahrten werden erkannt, worauf sich der Prototyp kooperativ verhält. Wenn möglich wird durch einen Fahrstreifenwechsel der rechte Fahrstreifen frei gemacht

oder die Geschwindigkeit angepasst, um anderen Verkehrsteilnehmern das Einfädeln zu ermöglichen. Der Versuchsträger lässt Fahrgeschwindigkeiten bis 130 km/h zu, berücksichtigt jedoch auch Verkehrsregeln wie Tempolimits, Rechtsfahrgebot und Rechtsüberholverbot.

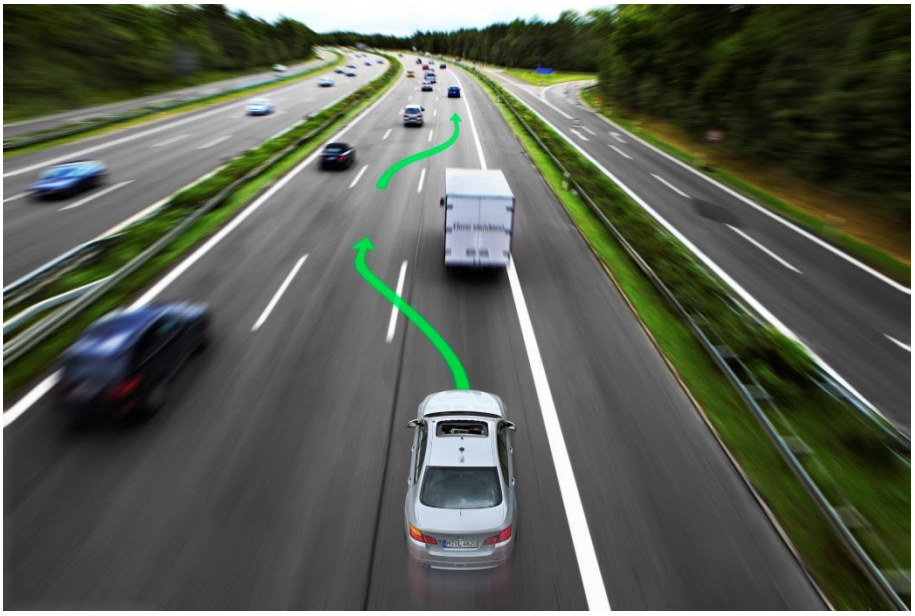


Abbildung 34: Selbstständiges Durchführen eines Überholvorgangs. (BMW, 2013c)

Auch bei diesem Projekt wird darauf hingewiesen, dass der Fahrer in der Verantwortung bleibt und seine Umgebung trotz aller technischen Unterstützung aufmerksam beobachten muss. Im Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr heißt es hierzu, dass der Fahrer seinen Wagen dauernd und unter allen Umständen kontrollieren muss (siehe auch Kapitel 7.2). Ein zukünftiger Serieneinsatz eines Autopiloten ist zwar nicht auszuschließen, aber bis ein Fahrzeug vollständig eigenmächtig fahren kann, bedarf es noch weiterer technischer Lösungen und vor allem zahlreicher politisch-legislativer Entscheidungen (vgl. Freymann, 2011).

Das Fahrzeug beobachtet das Umfeld durch die „redundante Fusion von verschiedenen Sensortechniken wie LIDAR, Radar, Ultraschall und Kameraerfassung auf allen Fahrzeugseiten“ (Pudenz, 2011b). Der Begriff redundant bedeutet hier, dass „in jede Richtung mindestens zwei unterschiedliche Messprinzipien“ (Pudenz, 2011b) genutzt werden, um die Situation rund um das eigene Fahrzeug zu erfassen. Nachteile eines Sensors werden so durch Vorteile eines anderen Sensors ausgeglichen. Durch die Verwendung von Kameratechnik und Ortungsdaten des GPS ist nicht nur der Fahrstreifen, auf dem sich das Fahrzeug aktuell befindet, sondern auch die exakte Position innerhalb des Fahrstreifens bestimmbar. Zudem müssen in der Umgebung befindliche Objekte mit sehr großer Robustheit erkannt werden, um die aktuelle Situation im Umfeld vollständig zu erfassen. Dies ist die Grundlage für das Erstellen verschiedener Handlungsstrategien, die beispielsweise einen Fahrstreifenwechsel ermöglichen.

Mit den nächsten Entwicklungsschritten soll der Umgang mit Autobahnkreuzen ermöglicht und automatisiertes Fahren in Baustellen realisiert werden. Besonders Baustellen stellen hohe Anforderungen an das System, da sie in vielfältiger Form auftreten können (vgl. Pudenz, 2011b).

6.1.3 Nothalteassistent

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung initiierten Projekts „SmartSenior – Intelligente Dienstleistungen für Senioren“ entwickelte BMW als Partner einen sogenannten Nothalteassistenten, der im medizinischen Notfall für mehr Sicherheit im Straßenverkehr sorgen kann. Dabei sollte eine Assistenzfunktion entworfen werden, die beim Erkennen einer gesundheitlichen Notfallsituation des Fahrers selbstständig das Fahrzeug übernimmt und ein sicheres Nothaltemanöver bis zum Stillstand auf dem Standstreifen durchführt, siehe Abbildung 35.

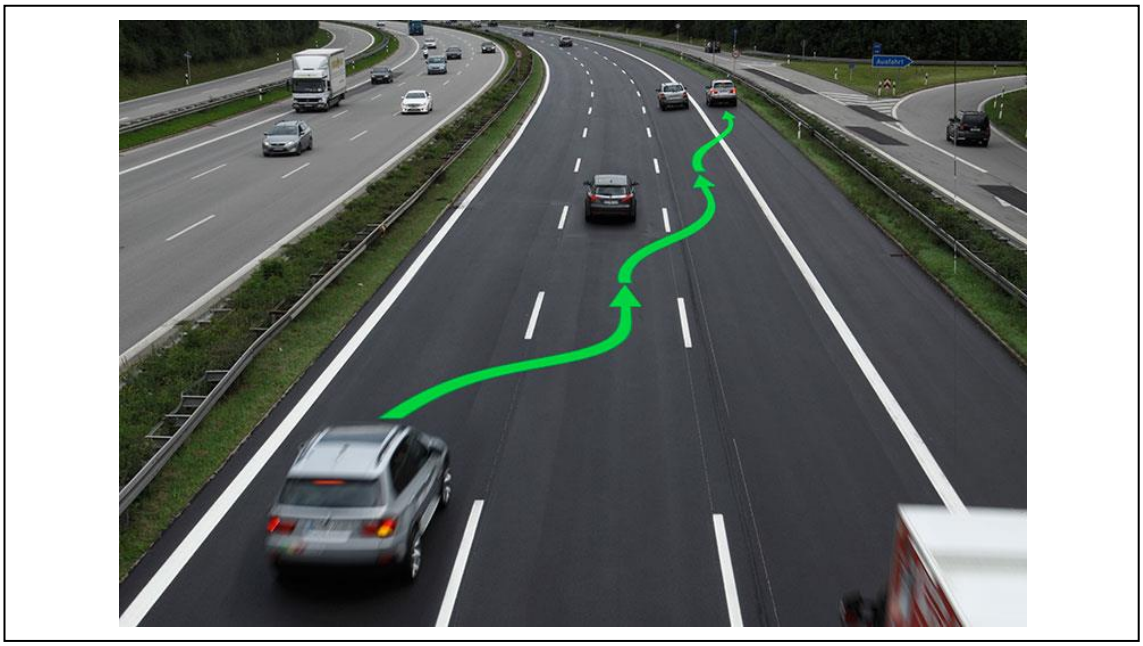


Abbildung 35: Funktionsprinzip Nothalteassistent. (AMS, 2010)

Wenn aufmerksames und vorausschauendes Fahren beispielsweise aufgrund einer plötzlich auftretenden gesundheitlichen Beeinträchtigung nicht mehr möglich ist, führt dies häufig zu Unfällen. Die beim Nothalteassistenten zum Einsatz kommende Sensortechnik soll daher die Vitalität des Fahrers überwachen und detektieren, falls der Fahrer nicht mehr in der Lage ist, das Fahrzeug selbstständig zu steuern. Wie die Fahruntüchtigkeit des Fahrers erkannt wird, ist den Quellen nicht zu entnehmen. Es ist jedoch anzunehmen, dass analog zum HAVEit-Projekt u.a. Kameratechnik zum Einsatz kommt, die hauptsächlich die Augen des Fahrers beobachtet. Stellt die Sensorik einen Notfall fest, übernimmt der Nothalteassistent die Längs- und Querführung des Fahr-

zeugs und stabilisiert dieses zunächst innerhalb des Fahrstreifens. Anschließend werden in Abhängigkeit des Verkehrsgeschehens kontrollierte Fahrstreifenwechsel nach rechts und schlussendlich auf den Standstreifen durchgeführt. Gleichzeitig wird die Geschwindigkeit bis zum Stillstand reduziert, die Warnblinkanlage eingeschaltet und ein automatischer Notruf (siehe auch Kapitel 5.4) für eine schnelle Alarmierung der Rettungskräfte abgesetzt (vgl. Pudenz (2011b) und BMW Presse (2009)).

Der Einsatz eines solchen Systems ist in zukünftigen Fahrzeugen, die automatisierte Fahrfunktionen besitzen, durchaus denkbar und auch rechtlich möglich (siehe Kapitel 7.2). Zum einen verfügen diese Fahrzeuge über die notwendige Umfeldsensorik, zum anderen kann ein solches System auch im Falle eines eingeschlafenen Fahrers einen automatisierten Anhaltevorgang durchführen. Speziell im Hinblick auf die autonome Kolonnenfahrt, bei der Fahrzeuge ohne Eingriffe des Fahrers über längere Strecken einander folgen, gilt es zu untersuchen, ob eine erhöhte Einschlafgefahr besteht. Reagiert der Fahrer z.B. nicht mehr darauf, dass er die Fahrfunktion wieder übernehmen muss, beispielsweise weil er laut Routenempfehlung des Navigationssystems die Kolonne verlassen sollte, ermöglicht der Nothalteassistent die Übernahme des Fahrzeugs und bringt es sicher zum Stehen. Er kann somit zukünftig eine wichtige Ergänzung und Sicherheitsfunktion zum automatisierten Fahren darstellen.

6.2 Autonome Kolonnenfahrt

6.2.1 KONVOI

Das vom Bundeministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderte Projekt KONVOI befasste sich von 2005 bis 2009 mit einer kooperativen Form der Bahnführung bei Lastkraftwagen. Kooperationspartner waren Unternehmen aus der Nutzfahrzeugindustrie, Speditionen und Universitäten[7]. Da die Gütertransportleistung stetig zunimmt, müssen Transportkapazitäten besser ausgelastet und der Verkehrsablauf optimiert werden. Zudem besteht der Wunsch, den Fahrer zu entlasten und den Spritverbrauch zu senken. Ein Abstandsregeltempomat (ACC) kann zwar den Verkehrsfluss beruhigen, er hat jedoch nur begrenzten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit eines Straßenquerschnitts. Daher wird der Ansatz zur Bildung von Fahrzeugkolonnen mit geringen Fahrzeugfolgeabständen untersucht. Im Rahmen dieses Projekts geschieht dies sowohl im Fahrsimulator, als auch parallel im kommerziellen Betrieb von Speditionen und somit auf Autobahnen im realen Straßenverkehr.

[7] Unternehmen aus der Nutzfahrzeugindustrie: MAN Nutzfahrzeuge AG; weitere Informationen zu Kooperationspartnern unter http://www.isac.rwth-aachen.de/aw/cms/website/themen/referenzen/strassenplanung_betrieb_und_verkehrste/~tnh/entwicklung_und_untersuchung_des_einsatz/?lang=de (Stand 07.2013)

Insgesamt vier Versuchsträger wurden mit der nötigen Sensorik, Aktorik und Kommunikationstechnik ausgestattet. Zur Längs- und Querführung verfügen die Lastkraftwagen über die entsprechenden Fahrerassistenzsysteme (siehe Kapitel 2), die hier in einem gemeinsamen Regler ausgeführt sind. Sie übernehmen die Regelung des Abstands zum Vordermann und zur Spurführung, siehe Abbildung 36.

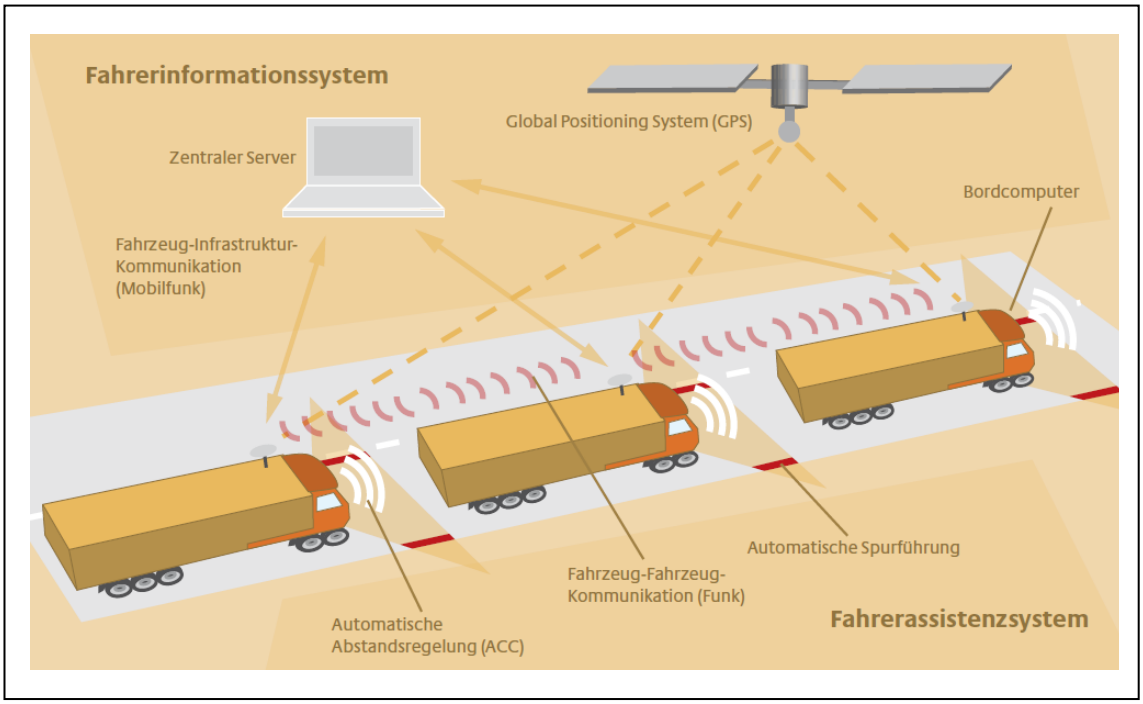


Abbildung 36: Lkw-Kolonne im Rahmen des KONVOI-Projekts. (BMWi, 2009; S. 17)

Die elektronische Kopplung der Fahrzeuge erfolgt über diese Assistenzsysteme. Über den zentralen KONVOI-Server sind die Fahrzeuge vernetzt. Er soll potentielle KONVOI-Teilnehmer bei der Bildung der Fahrzeugkolonne unterstützen. Die Kommunikation erfolgt via Mobilfunk. Für den Informationsaustausch innerhalb der Fahrzeugkolonne wird auf WLAN zurückgegriffen, jedoch noch nicht in dem vom Car-to-Car-Communication-Consortium beschlossenen Frequenzbereich (siehe Kapitel 5.5.1). Das Projekt zeigt auch, dass ein leistungsfähiges und zuverlässiges Kommunikationsnetz für eine stabile Regelung der Fahrzeugkolonne unerlässlich ist und eine Informationserfassung über die sensorseitige Umfelderfassung hinaus deutliche Vorteile bringt (vgl. IKA (2005) und Winner et al. (2012)).

6.2.2 SARTRE

Das von der Europäischen Kommission unterstützte Projekt SARTRE (Safe Road Trains for the Environment) beschäftigte sich von 2009 bis 2012 mit der Umsetzung einer autonomen Kolonnenfahrt auf öffentlichen Straßen. Kooperationspartner im Rahmen des Projekts waren der Entwicklungsdienstleister Ricardo, Volvo sowie weite-

re Firmen und Forschungsinstitute[8]. Im Vordergrund stand neben der technischen Umsetzung die Vision, ein neues Mobilitätssystem zu schaffen. Ähnlich wie im öffentlichen Nahverkehr tritt man hier einem Verkehrsmittel, dargestellt durch die Fahrzeugkolonne, bei und verlässt dieses wieder bei Bedarf. Als Nebeneffekte stellen sich eine Entlastung des Fahrers, eine gesteigerte Sicherheit wie auch eine Reduzierung des Spritverbrauchs ein. Am Projektende war die Entwicklung so weit vorangeschritten, dass mehrere Pkw an einer Fahrzeugkolonne teilnehmen und über eine Strecke von etwa 200 km zuverlässig einem Lkw folgen konnten.

Das entwickelte Konzept zur Kolonnenfahrt sieht vor, dass ein Fahrzeug mit einem ausgebildeten Fahrer als Kolonnenführung fungiert und sich andere Fahrzeuge dahinter elektronisch „ankoppeln“. Hierzu positioniert der Fahrer sein Fahrzeug hinter einer Kolonne und teilt seinem Fahrzeug mit, dass er der Kolonne beitreten möchte. Daraufhin übernimmt das Fahrzeug die Längs- und Querführung. Als Führungsfahrzeuge sind im Rahmen des Projekts Lastkraftwagen vorgesehen (siehe Abbildung 37), da man professionellen Lkw-Fahrern am ehesten die Übernahme der Verantwortung für die Kolonne zutraut.

Abbildung 37: "Road Train" bestehend aus Lkw und Pkw. (SARTRE, 2013)

Um Fahrfehler dennoch zu vermeiden, muss auf geeignete Sensorik und Fahrerassistenzsysteme zurückgegriffen werden, die beispielsweise ein Abkommen des Führungsfahrzeugs von der Fahrbahn inklusive der Folgefahrzeuge verhindern. Für die Kopplung der Fahrzeuge kommt heutige Sensortechnik (Kameras, Radarsysteme und Lasersensoren), wie sie auch im Zusammenhang mit den Assistenzsystemen zur Längs-

[8] Kooperationspartner SARTRE: Ricardo (Großbritannien) , Volvo Car Corporation and Volvo Technology (Schweden), Applus+, Idiada und Tecnalia (Spanien), Institut für Kraftfahrwesen (ika) Aachen (Deutschland)

und Querführung verwendet wird, zum Einsatz. Ferner müssen die Voraussetzungen in den Fahrzeugen vorhanden sein, um selbstständig bremsen, beschleunigen und lenken zu können (vgl. Kapitel 2 und 8.1). Da diese Funktionsumfänge ebenfalls heute in Serie erhältlich sind, konnte darauf verzichtet werden, im Rahmen des Projekts teure Zusatzkomponenten zu entwickeln. Die Versuchsfahrzeuge unterscheiden sich von modernen Serienfahrzeugen lediglich durch eine angepasste Software und durch die Möglichkeit, Nachrichten in Echtzeit über eine drahtlose Netzwerkverbindung (WLAN nach 802.11p Standard, siehe auch Kapitel 5.5) austauschen zu können. Hier werden beispielsweise die Geschwindigkeit des Führungsfahrzeugs, aber auch die Vorgaben für die Abstände zwischen den Fahrzeugen übermittelt.

Nach der Konzeption des Projekts wird das Führungsfahrzeug konventionell von einem Fahrer gesteuert, der jedoch von Fahrerassistenzsystemen unterstützt wird. Im Gegensatz dazu sollen sich die Folgefahrzeuge völlig autonom bewegen, sodass deren Fahrer andere Tätigkeiten durchführen können. Beispiele wie lesen, telefonieren, am Laptop arbeiten, essen oder entspannen und Musik hören zeigt Abbildung 38.

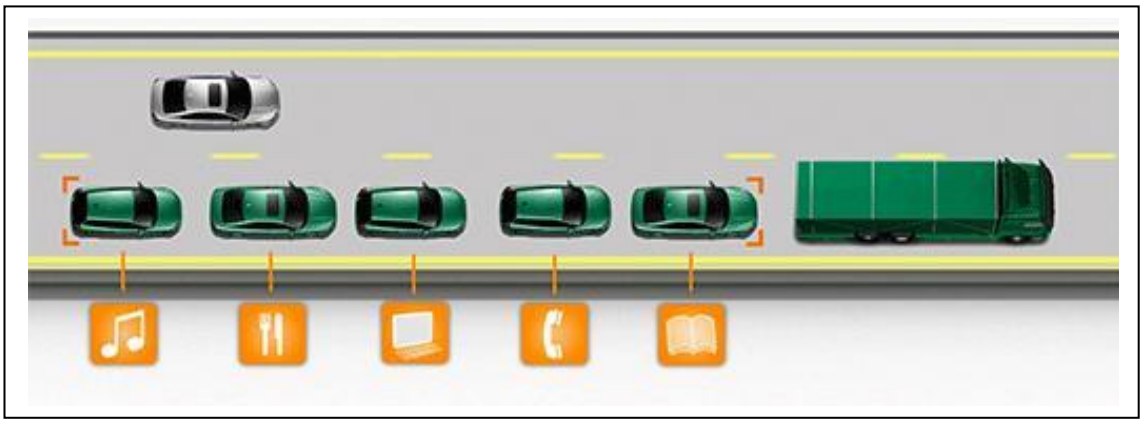


Abbildung 38: Alternativtätigkeiten in einer Fahrzeugkolonne. (Larburu et al., 2010; S. 2)

Die Fahrzeuge in der Kolonne folgen einander mit einem Abstand von etwa sechs Meter bei einer Geschwindigkeit von bis zu 85 km/h. Linda Wahlström, Projektmanagerin bei Volvo, beschreibt, dass dies zunächst ein unheimliches Gefühl sei. Die Versuche hätten jedoch gezeigt, dass sich die Fahrer relativ schnell daran gewöhnen. Der geringe Fahrzeugfolgeabstand resultiert aus dem Wunsch nach einer Senkung des Spritverbrauchs. Es wird erwartet, dass der Gesamtverbrauch der Kolonne aufgrund der Windschatteneffekte um 10 bis 20 Prozent niedriger ausfällt.

Da es u.a. Ziel des Projekts war, ein neues Mobilitätssystem zu schaffen, soll auch dieser Aspekt kurz beleuchtet werden. Der Fahrer eines Fahrzeugs, das sich einer Fahrzeugkolonne anschließt, genießt mehrere Vorteile. Zum einen muss er sich nicht mehr auf das Verkehrsgeschehen konzentrieren, zum anderen kann er die Zeit nutzen, um beispielsweise Emails zu schreiben. Somit besteht Ähnlichkeit zu einer Zugfahrt,

jedoch mit dem Unterschied, dass man sich nicht um Abfahrtszeiten kümmern muss. Dies setzt aber auch voraus, dass eine ausreichende Anzahl an Führungsfahrzeugen vorhanden ist um für eine hohe Wahrscheinlichkeit zu sorgen, stets eine Kolonne anzutreffen. Um garantiert eine Fahrzeugkolonne anzutreffen, besteht parallel die Möglichkeit, sich via Internet von zuhause oder unterwegs via Smartphone über das Angebot an Kolonnenfahrten zu informieren. Hier können beispielsweise Speditionen, ähnlich wie bei einer Plattform für Mitfahrgelegenheiten, Abfahrtsorte und Abfahrtszeit sowie Reiseziel angeben. Ein potentieller Kolonnennutzer muss dann zum richtigen Zeitpunkt auf die Autobahn auffahren und sich der Kolonne anschließen. Neben der Möglichkeit, anderen Tätigkeiten während der Autofahrt nachzugehen, profitiert ein Kolonnenteilnehmer infolge des verringerten Luftwiderstands von einem geringeren Spritverbrauch. Der Serviceanbieter, der die Möglichkeit zur Kolonnenfahrt bietet, ist der Führungs-Lkw und dessen ausgebildeter Fahrer, der die Verantwortung trägt. Daher ist es nachvollziehbar, dass von den Nutzern der Fahrzeugkolonne eine Gebühr eingezogen werden soll und der Fahrer beziehungsweise der Anbieter des Führungsfahrzeugs eine Vergütung erhält. Meldungen oder Warnungen des Systems müssen von den Fahrern wahrgenommen und umgesetzt werden. Kommen sie dieser Aufforderung nicht nach, können sie mit Strafzahlungen belangt werden. Das System zur Regelung des Kostenaspekts soll dabei nach Vorgaben der Projektpartner so organisiert sein, dass sich das Buchen und die Teilnahme an einer Kolonnenfahrt einfacher gestaltet als die Nutzung von öffentlichen Verkehrsmitteln.

Die Fahrversuche des SARTRE-Projekts haben gezeigt, dass eine autonome Kolonnenfahrt auf Autobahnen umsetzbar ist. Die technische Realisierung ist im Vergleich zu einem einzeln fahrenden vollautomatisierten Fahrzeug vergleichsweise einfach, da die Kolonnenteilnehmer sich lediglich der Kolonne anschließen und dem Führungsfahrzeug automatisiert folgen müssen. Da das System vollständig kompatibel zu Fahrzeugen ist, die sich konventionell fortbewegen, ändert sich für Fahrzeuge, die nicht an der autonomen Kolonnenfahrt teilnehmen möchten beziehungsweise die nicht über die technischen Möglichkeiten hierfür verfügen, kaum etwas. Um jedoch Konflikte an Ein- und Ausfahrten zu vermeiden, soll die maximale Teilnehmerzahl auf 15 Folgefahrzeuge begrenzt werden. Auf die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern wird auch in Kapitel 9.2 eingegangen.

Für eine Zulassung des Systems müssen technische Fehler praktisch ausgeschlossen sein. Hierfür bietet der Einsatz redundanter Systeme Lösungsmöglichkeiten. Der Fahrbetrieb in der Fahrzeugkolonne muss auch bei Notbremsungen oder plötzlichen Ausweichmanövern zuverlässig funktionieren. Eine weitere Herausforderung stellt die Rückgabe der autonomen Fahrzeugführung an den Fahrer dar. Sollte die Kolonne aufgelöst werden oder tritt ein Fehler auf, muss der Fahrer gewarnt und wieder „aktiviert“ werden um die Fahrzeugführung zu übernehmen. Verschiedene Lösungsansätze hierfür werden derzeit entwickelt. Sie befinden sich aber noch nicht in einem serienreifen Zustand (vgl. Pudenz (2012a), Goppelt (2012), Robinson et al. (2010)).

Teil 2

Umsetzung und Auswirkung der autonomen Kolonnenfahrt auf Autobahnen

Anforderungen

Systemübersicht und Zusammensetzung

Handlungsstrategien

Auswirkungen

7 Anforderungen an die autonome Kolonnenfahrt

In Teil 1 dieser Ausarbeitung wurde auf den aktuellen Stand der Technik eingegangen. Im Hinblick auf die autonome Kolonnenfahrt wurden die relevanten Fahrerassistenzsysteme und deren Sensorik wie auch die Möglichkeiten zur Informationserfassung und zur Fahrzeugkommunikation vorgestellt.

Für eine Markteinführung von Assistenzsystemen zur (autonomen) Kolonnenfahrt müssen noch zahlreiche rechtliche und technische Aspekte berücksichtigt werden. Bei den gesetzlichen Randbedingungen reichen die Fragestellungen von der Zulassung bis hin zur Haftung bei Unfällen. Bei den technischen Randbedingungen müssen für eine erfolgreiche Einführung Standards geschaffen werden. Die genannten Punkte sollen im Folgenden betrachtet werden. Für eine bessere Verständlichkeit und um Verwechslungen vorzubeugen, werden jedoch zunächst einige Definitionen für die autonome Kolonnenfahrt getroffen, wie sie in dieser Arbeit weiter verwendet werden.

7.1 Definitionen

Im Folgenden werden für ein besseres Verständnis der nun betrachteten autonomen Kolonnenfahrt verschiedene Begriffe definiert, siehe Tabelle 2 auf Seite 104. Diese sind teilweise auch bei den Projekten KONVOI (siehe z.B. BMWI, 2009), SARTRE (vgl. Bergenhem et al., 2010) usw. zu finden.

Unter einer „autonomen Kolonne“ wird in dieser Arbeit eine Gruppe von zwei oder mehr Fahrzeugen verstanden, die durch elektronische Systeme miteinander „verbunden“ sind bzw. in Kommunikation stehen. Die Längs- und Querführung der Kolonne soll mindestens bei den Folgefahrzeugen hochautomatisiert durchgeführt werden, wodurch die Folgefahrzeuge dem Führungsfahrzeug in geringerem Abstand als dem aktuell vorgeschriebenen Sicherheitsabstand („Halber-Tacho-Regel“) folgen können. Vereinfacht wird in dieser Arbeit auch nur der Begriff „Kolonne“ verwendet.

Des Weiteren werden grundlegende Fahrmanöver definiert, die die autonome Kolonnenfahrt betreffen. Die Beschreibungen hierzu sind in dieser oder ähnlicher Form ebenfalls bei Bergenhem et al. (2010) zu finden, Tabelle 3 auf Seite 105. Die Manöver werden zum Teil in den folgenden Abschnitten betrachtet.

Begrifflichkeit	Erklärung
Kolonne	Eine (autonome) Kolonne besteht aus einem Führungsfahrzeug und einem oder mehreren Folgefahrzeugen. Die Fahrzeuge sind elektronisch über C2CC verbunden und verfügen für die Kolonnenfahrt über die notwendige Umfeldsensorik (vgl. Bergenhem et al., 2010).
Führungs-fahrzeug (FüF)	Fahrzeug in Front der Kolonne, das für die Führung der Kolonne verantwortlich ist. Das Führungsfahrzeug kann entweder durch (ausgebildete) Fahrer mit der Unterstützung von Assistenzsystemen wie ACC und LKS assistiert oder teilautomatisiert gesteuert werden (vgl. Bergenhem et al. (2010) und BMWI (2009)) oder in Zukunft ebenfalls selbständig hoch- oder vollautomatisiert fahren (eine genaue Festlegung ist für die vorliegende Arbeit nicht notwendig). Bei Bergenhem et al. (2010) werden nur Lkw als Führungsfahrzeug betrachtet, da die Fahrzeugführer speziell ausgebildet werden sollen. In dieser Arbeit werden jedoch auch Busse und Pkw als mögliche Führungsfahrzeuge betrachtet (siehe Abschnitt 8.2).
Folgefahrzeug (FoF)	Ein Fahrzeug hinter dem Führungsfahrzeug, das durch dieses geführt wird. Das Folgefahrzeug verfügt über die notwendige Technik und Umfeldsensorik, die eine hochautomatisierte Längs- und Querführung ermöglichen.
Sonstiges Fahrzeug (SF)	Ein Fahrzeug (Lkw, Bus oder Pkw), das momentan nicht Bestandteil einer Kolonne ist (im Folgenden auch als nicht gekoppelter Verkehr bezeichnet). Bei entsprechender Ausstattung kann das sonstige Fahrzeug ggf. einer Kolonne als Folgefahrzeug beitreten oder als Führungsfahrzeug eine neue Kolonne bilden.
Folgeabstand	Der Abstand zwischen den Fahrzeugen einer Kolonne (Netto-Abstand, von der hinteren Stoßstange des vorausfahrenden Fahrzeugs zur vorderen Stoßstange des hinterherfahrenden Fahrzeugs). Im Gegensatz zum ACC wird dieser hier nicht über eine Zeitlücke (vgl. Kapitel 2.1.1.2), sondern über eine Weglücke definiert (regelungstechnisch vorteilhaft und anschaulicher, da die Reaktionszeit des Fahrers bei der Kolonnenfahrt nicht betrachtet werden muss).
Kolonnen-geschwindigkeit	Die (aktuelle) Fahrgeschwindigkeit der Kolonne, die vom Führungsfahrzeug vorgegeben wird.

Tabelle 2: Definitionen für die autonome Kolonnenfahrt.

Begrifflichkeit	Erklärung
Kolonne bilden	Ein Führungs- und mindestens ein Folgefahrzeug bilden eine neue Kolonne.
Kolonne beitreten	Ein Fahrzeug tritt einer bestehenden Kolonne bei und wird damit zu einem Folgefahrzeug.
Kolonne anpassen	Alle Manöver bzw. Aktionen, die die Positionen der Kolonnenteilnehmer sowie die Kolonnengeschwindigkeit betreffen, ausgelöst z.B. durch sonstige Fahrzeuge oder bevorstehende Manöver wie z.B. „Kolonne verlassen“ oder „auflösen“.
Kolonne verlassen	Ein Folgefahrzeug verlässt die Kolonne. Verlässt das letzte verbleibende Folgefahrzeug die Kolonne, so entspricht dies dem Fall „Kolonne auflösen“.
Kolonne auflösen	Die Kolonne wird durch das Führungsfahrzeug aufgelöst, da dieses z.B. die nächste Ausfahrt verwenden möchte, oder wenn das letzte verbleibende Folgefahrzeug die Kolonne verlässt.

Tabelle 3: Definition von möglichen Aktionen mit bzw. in einer autonomen Kolonne.

7.2 Gesetzliche Aspekte für die autonome Kolonnenfahrt

In den EG-Typgenehmigungen gibt es keine direkten Bauvorschriften für Fahrerassistenzsysteme, sie müssen jedoch in anderen Bereichen wie der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) und der Zuverlässigkeit bzw. Ausfallsicherheit berücksichtigt werden (vgl. Winner et al., 2012; Beispiel: Steer-by-Wire-Systeme, Kapitel 2.2.1). Die für die autonome Kolonnenfahrt benötigten technischen Systeme sind in ihrer Grundform in Serienfahrzeugen bereits vorhanden und dürften deshalb keine besonderen Probleme bei der Zulassung haben. Eine Ausnahme stellt die ECE-Regelung Nr. 79 zur Typzulassung der Lenkanlage dar, nach der automatisierte Lenkfunktionen nur bis maximalen 12 km/h zulässig sind, z.B. bei einem Einparkassistent – darüber hinaus sind automatisierte Steuerungen nicht zulässig. Für höhere Geschwindigkeiten, wie sie bei der Autobahnfahrt vorkommen, bedarf es also einer Anpassung dieser Regelung (vgl. BASt F83, 2012).

Im Gegensatz zur Typgenehmigung gestaltet sich die rechtliche Lage in Bezug auf den Straßenverkehr jedoch weitaus schwieriger. Grundsätzlich haben die hier betrachteten und für die autonome Kolonnenfahrt benötigten Fahrerassistenzsysteme einen meist direkten Zusammenhang zur Fahraufgabe, weshalb verhaltensrechtliche Anforderungen aus den Straßenverkehrsordnungen bzw. aus dem Straßenverkehrsrecht berücksichtigt werden müssen (Winner et al., 2012). Diese sind i.d.R. länderspezifisch geregelt, basieren in ihrer Grundform jedoch häufig auf dem „Wiener Übereinkommen über

den Straßenverkehr (WÜ-StV)“[9] von 1968. Entsprechend dem damaligen Stand der Technik konnten die heute verwendeten und die hier betrachteten Fahrerassistenzsysteme nicht berücksichtigt werden.

Im Hinblick auf Fahrerassistenzsysteme im Allgemeinen sowie auf autonome Fahrzeuge im Speziellen sind vier Vorschriften des WÜ-StV (siehe WÜ-StV, 1968) besonders relevant, wie sie auch bei Winner et al. (2012) aufgeführt werden:

- **Artikel 1 lit. v) WÜ-StV:** „‘Führer‘ ist jede Person, die ein Kraftfahrzeug oder ein anderes Fahrzeug (Fahrräder eingeschlossen) lenkt […].“
- **Artikel 8 Abs. 1 WÜ-StV:** „Jedes Fahrzeug und miteinander verbundene Fahrzeuge müssen, wenn sie in Bewegung sind, einen Führer haben.“
- **Artikel 8 Abs. 5 WÜ-StV:** „Jeder Führer muss dauernd sein Fahrzeug beherrschen oder seine Tiere führen können.“
- **Artikel 13 Abs. 1 WÜ-StV:** „Jeder Fahrzeugführer muss unter allen Umständen sein Fahrzeug beherrschen, um den Sorgfaltspflichten genügen zu können und um ständig in der Lage zu sein, alle ihm obliegenden Fahrbewegungen auszuführen. […]“

Bis auf wenige Ausnahmen wird die Ansicht vertreten, dass nach dem Wiener Übereinkommen autonom fahrende Fahrzeuge nicht zulässig sind, da der Fahrer die Assistenzsysteme in diesem Fall nicht jederzeit und vollständig übersteuern kann. Bei der hoch- und vollautomatisierten Fahrzeugführung soll der Fahrer jedoch anderen Tätigkeiten nachgehen können. Einzelsysteme wie ACC zur Längsführung und Spurhalteassistenten zur Querführung sind jedoch zulässig, da der Fahrer hier ständig das System überwachen muss und es jederzeit übersteuern kann. Systeme wie ABS und ESC sind zwar wiederum nicht übersteuerbar, setzen jedoch den Fahrerwunsch in optimierter Form um und sind deshalb ebenfalls zulässig (vgl. Winner et al., 2012). Für eine Zulassung autonom agierender Systeme muss außerdem prinzipiell gelten, dass das Risiko nicht höher ist als das Risiko des Istzustands (vgl. ebenfalls Winner et al., 2012), was entsprechend abgesichert werden muss.

Eine Ausnahme stellt der Nothalteassistent dar, wie er z.B. in Kapitel 6.1.3 vorgestellt wird. Der Nothalteassistent ist zwar als vollautomatisiertes System anzusehen, greift aber nur dann vollständig in die Fahrzeugführung ein, wenn die Handlungsunfähigkeit oder Bewusstlosigkeit des Fahrers erkannt wird. Da der Fahrzeugführer in dieser Situation weder den Verkehr beobachten noch das Fahrzeug sicher beherrschen kann, ist ein vollautomatisierter Anhaltevorgang zulässig, da das System in diesem Fall einen risikominimalen Zustand herstellt (vgl. BASt F83, 2012). Voraussetzung ist jedoch, dass die physische Handlungsunfähigkeit des Fahrers sicher erkannt wird.

[9] Das WÜ-StV ist ein völkerrechtlicher Vertrag und ist in den meisten europäischen Mitgliedsstatten und anderen Staaten weltweit gültig. Die nationalen Vorschriften, in Deutschland z.B. die Straßenverkehrsordnung StVO, müssen das WÜ-StV entsprechend berücksichtigen (Winner et al., 2012).

Neben den Aspekten der „Fahrzeugführung“ muss im Falle der autonomen Kolonnenfahrt auch eine Anpassung bezüglich der gesetzlichen Mindestabstände („Halber-Tacho-Regel“) berücksichtigt werden.

Ein weiterer wichtiger rechtlicher Aspekt bei Fahrerassistenzsystemen ist die Haftung im Falle eines Unfalls. Laut BASt-Bericht F83 zu den Rechtsfolgen von Fahrzeugautomatisierungen (2012) ist die Halterhaftung (§ 7 Abs. 1 StVG) bei der Verwendung von Assistenzsystemen nach wie vor vorhanden, da der Fahrzeughalter grundsätzlich durch das Fahrzeug ein Risiko in den Verkehr einbringt (vgl. auch Gasser, 2012). Gleiches gilt für die Haftung des Fahrzeugführers, wobei hier bei der Vollautomatisierung eine andere Situation vorhanden ist. Bei autonomen Fahrzeugen wäre die Belastung des Fahrzeugführers geringer einzustufen, da diesem „unmittelbar die Vorteile aus der Verwendung des hoch- oder vollautomatischen Systems zugutekommen“ (vgl. BASt F83 (2012), S. 19).

Für die Fahrzeughersteller ist die Produkthaftung relevant. In Deutschland muss der Anspruchsteller den Fehlernachweis führen und den Zusammenhang mit dem entstandenen Schaden aufzeigen (vgl. BASt F83, 2012). Zusätzlich kann sich der Hersteller durch entsprechende Hinweise und Instruktionen z.B. in einer Bedienungsanleitung absichern. Bei Fahrerassistenzsystemen, die der Fahrer nach wie vor überwachen und jederzeit übersteuern können muss, ist die Instruktion des Fahrers durch den Fahrzeugherstellers daher besonders wichtig. Eine Instruktion ist jedoch auch bei hoch- und vollautomatisierten Fahrzeugen zwingend notwendig.

Bei den hoch- und vollautomatisierten Fahrzeugen wird auch vorausgesetzt, dass der Fahrer das Fahrzeug nicht mehr überwachen muss. Die Übernahme der Fahrzeugsteuerung durch den Fahrer erfolgt erst nach einer gewissen zeitlichen Verzögerung, weshalb die hoch- und vollautomatisierten Systeme so ausgelegt sein müssen, dass sie alle Situationen bewältigen können (BASt F83, 2012). Bei der vollautomatisierten Fahrt würde also vordergründig der Hersteller haften. Ausnahmen sind hier jedoch die Fälle und Situationen, die durch andere Verkehrsteilnehmer entstehen, da sich ein Verkehrsteilnehmer nach heutigem Recht ebenfalls nicht auf das Fehlverhalten anderer Verkehrsteilnehmer einstellen muss. In diesem Fall liegt also nicht zwingend ein Produktfehler vor (vgl. ebenfalls BASt F83, 2012). Eine weitere Ausnahme stellt der bereits erwähnte Nothalteassistent dar, der aufgrund seiner Eigenschaften produkthaftungsrechtlich nicht kritisch ist (BASt F83, 2012).

Zu ähnlichen Ergebnissen bezüglich der Produkthaftung kommt auch ein Bericht der Universität Berkeley (Kalra et al., 2009), wobei diese den rechtlichen Hintergrund in den USA betrachten. Laut Kalra et al. (2009) könnten die Fahrzeughersteller bei Unfällen/Schäden mit hoch- und vollautomatisierten Fahrzeugen haftbar sein, weshalb Produktwarnungen und Fahrerschulungen eine enorm wichtige Rolle beim Einsatz dieser Systeme spielen werden.

Im Hinblick auf die autonome Kolonnenfahrt, wie sie hier betrachtet wird, bedeuten die aufgezeigten Punkte, dass das System nicht zwingend das Fehlverhalten der anderen Verkehrsteilnehmern berücksichtigen müsste, zudem dies auch kaum vollständig abzusichern sein wird. Ein möglichst sicheres System in allen Situationen muss dennoch das oberste Ziel sein.

Bei Winner et al. (2012) wird bei der Produkthaftung autonomer Fahrzeuge auch auf die Hersteller- bzw. Betreiberhaftung in der Luftfahrt als möglicher Ansatz verwiesen (Montrealer Übereinkommen für die Luftfahrt). Auch würde nach wie vor der Fahrzeughalter bzw. Fahrzeugführer haften, wenn dieser z.B. trotz winterlichen Straßenverhältnissen mit Sommerreifen unterwegs ist. Um rechtliche Ansprüche nach Unfällen besser klären zu können, wären eine zeitlich begrenzte Datenaufzeichnung – ähnlich der „Black Box“ in Flugzeugen – ggf. sinnvoll.

Wie anhand der in diesem Abschnitt kurz dargestellten Aspekte deutlich wird, besteht bei den gesetzlichen Regelungen bezüglich hoch- und vollautomatisierten Fahrzeuge ein dringender Klärungsbedarf. Hier sollten Gesetzgebung sowie Industrie und Forschung noch stärker kooperieren. Jedoch nicht nur im Hinblick auf die rechtlichen Rahmenbedingungen, sondern auch im Hinblick auf Themen wie die Standardisierung von (kooperierenden) Fahrerassistenzsystemen gibt es noch Handlungsbedarf, wie im folgenden Abschnitt dargestellt wird.

7.3 Technische Aspekte für die autonome Kolonnenfahrt

Neben den bereits aufgeführten rechtlichen Randbedingungen sind auch zahlreiche technische Aspekte zu berücksichtigen, um eine autonome Kolonnenfahrt auf Autobahnen zu ermöglichen. Eine erste Anforderung sollte sein, dass die Kolonnen keine Änderungen an der Straßeninfrastruktur erfordern (z.B. Sonderfahrstreifen), da diese einer Einführung des Systems aus wirtschaftlichen Gründen entgegenstünden. Hieraus ergibt sich wiederum, dass die Kolonnen mit dem nicht gekoppelten Verkehr interagieren können müssen, siehe Abschnitt 9.2.

Für eine Zulassung gilt, dass das Risiko für alle Verkehrsteilnehmer durch die autonomen Systeme nicht höher sein darf als ohne diese Systeme. Die Absicherung dieser Vorgabe ist wahrscheinlich die größte Herausforderung für die Zulassung autonomer Systeme, da die bisher bekannten Testmanöver keine wirtschaftliche Entwicklung zulassen (Winner et al., 2012). Des Weiteren müssen grundlegende Systembestandteile standardisiert werden, um auch Kolonnen mit Fahrzeugen verschiedener Hersteller bilden zu können. Dies betrifft die Anforderungen an die Umfelderfassung, die C2X-Communication, die Bedienkonzepte sowie den technischen Fahrzeugzustand.

Vorgaben für die Qualität der Umfelderfassung sollten gemacht werden, damit z.B. eine stabile und robuste Abstandsregelung innerhalb der Kolonne erreicht wird. Die

Festlegung auf bestimmte Sensortechniken ist jedoch nicht notwendig, da die notwendige Qualität mit verschiedenen Konzepten erreicht werden kann, vgl. Kapitel 3. Außerdem bleibt hierdurch die Freiheit und Kreativität bei der technischen Umsetzung erhalten.

Wie in Kapitel 5 bereits aufgezeigt wurde, ist ein Standard für die C2X-Communication ebenfalls notwendig. Durch eine einheitliche C2X-Communication kann sichergestellt werden, dass nicht nur Fahrzeuge von einem Hersteller gekoppelt werden können – wodurch die Kundenakzeptanz sowie die Marktdurchdringung gefördert werden können. Idealerweise sollten auch die sonstigen Fahrzeuge an der C2X-Communication teilnehmen können.

Gleiches gilt für (Mindest-)Standards in den Bedienkonzepten, also der Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS bzw. HMI). Hierzu gehört z.B. die Gestaltung des Übergangs vom automatisierten zum manuellen Fahren beim Verlassen der Kolonne und umgekehrt beim Beitritt zur Kolonne. An dieser Stelle wird jedoch bzgl. der MMS-Konzepte nur auf abgeschlossene bzw. laufende Projekte (z.B. SARTRE[10], CityMobil[11]) sowie weitere Literatur (z.B. Habenicht (2012), Winner et al. (2012)) verwiesen.

Letztendlich sollten auch Anforderungen an den technischen Zustand der beteiligten Fahrzeuge gestellt werden, um die Sicherheit der ganzen Kolonne und der anderen Verkehrsteilnehmer zu gewährleisten. Vor allem die Fahrzeughalter müssen hier in die Pflicht genommen werden. Als Beispiel kann an dieser Stelle die bereits erwähnte Sommerreifen-Problematik bei winterlichen Straßenverhältnissen herangezogen werden. Fortschritte in der Fahrzeugeigendiagnose sind jedoch ebenfalls sehr hilfreich und notwendig (z.B. Belagsverschleißmessung, Sensorkalibrierung usw.).

Im Gegensatz zu ACC-Systemen, die auch in gewissen Grenzen für Fahrzeuge mit manuellem Schaltgetriebe verwendet werden können (vgl. Kapitel 2.1.1), müssen Fahrzeuge für die autonome Kolonnenfahrt bzw. allgemein für eine automatisierte Längsführung über automatisch schaltende Getriebe verfügen. Ansonsten wäre an Steigungen z.B. ein Schaltvorgang durch den Fahrer notwendig und somit keine vollautomatisierte Längsführung gegeben.

Die aufgezeigten Bereiche sollten mindestens durch Kooperationen verschiedener Fahrzeughersteller und Zulieferer, besser durch Normen und/oder gesetzliche Vorgaben sichergestellt werden. Dies ermöglicht die Entwicklung eines sicheren Systems, eine hohe Kundenakzeptanz und damit auch eine höhere Marktverbreitung. Die genannten technischen Aspekte werden teilweise in den folgenden Abschnitten detaillierter betrachtet. Es wird für die folgenden Betrachtungen angenommen, dass die Fahrzeuge über die notwendigen Technologien zur autonomen Kolonnenfahrt verfügen und diese auch rechtlich möglich ist.

[10] Siehe z.B. Larburu et al., 2010.

[11] Siehe z.B. Martens et al., 2007.

8 Systemübersicht und Zusammensetzung der autonomen Kolonnenfahrt

Für dieses und die folgenden Kapitel wird angenommen, dass eine autonome Kolonnenfahrt, wie sie in Kapitel 7.1 definiert wurde, technisch und rechtlich möglich ist. Bei den technischen Aspekten, wie z.B. bei der Fahrzeugkommunikation, müssen i.d.R. Annahmen getroffen werden, die an entsprechender Stelle erläutert werden.

Im Folgenden wird – im Hinblick auf die benötigten Komponentengruppen und deren Zusammenwirken – zuerst ein möglicher Systemaufbau vorgestellt. Auch die Systemsicherheit soll kurz beleuchtet werden. Anschließend wird die mögliche Zusammensetzung der Kolonnen betrachtet. Dabei wird vor allem auf die Ermittlung des Folgeabstands eingegangen. Es werden sowohl homogene als auch inhomogene Kolonnen betrachtet – also Kolonnen, die entweder nur aus einem oder aus verschiedenen Fahrzeugtypen aufgebaut sind.

8.1 Systemübersicht

Wie bereits in Kapitel 2 deutlich wurde, sind die technischen Komponenten zur automatisierten Längs- und Querführung vorhanden. Auch die notwendige Umfeldsensorik ist bereits verfügbar. Für die Kolonnenfahrt gilt es nun, diese Teilsysteme zu einem Gesamtsystem zu vernetzen. Dabei ist auch eine Fahrzeugkommunikation mindestens zwischen den Kolonnenteilnehmern zwingend notwendig. Durch die Fahrzeugkommunikation und eine entsprechende Regelung können die Anforderungen an die Umfeldsensorik ggf. gesenkt werden, was die Systeme günstiger machen könnte. Ein grober Überblick über die Systemkomponenten und deren Wirk- bzw. Regelkreis wird in den Abschnitten 8.1.1 und 8.1.2 gegeben. In Kapitel 8.1.3 werden verschiedene Aspekte der Systemsicherheit angesprochen.

8.1.1 Systemkomponenten für die Kolonnenfahrt

Zur Umsetzung der Kolonnenfahrt können die benötigten Komponenten vier wesentlichen Modulen zugeordnet werden. Diese umfassen die Module zur Kommunikation, zur Längs- und Querführung, sowie zur Bedienung (HMI), Abbildung 39.

Das Kommunikationsmodul beinhaltet den Kolonnenregler sowie die notwendige Kommunikationstechnologie zur Kommunikation zwischen den Kolonnenteilnehmern, wobei auch ein Ortungssystem wie GPS oder zukünftig auch Galileo notwendig ist. Zwischen den Fahrzeugen der Kolonne sollten mindestens Informationen bzgl. deren Position, deren fahrdynamische Größen sowie durch die Umfeldsensorik erfasste sonstige Fahrzeuge übertragen werden. Hinzu kommen Informationen zur Fahrtroute. Zwi-

schen der Kolonne und den sonstigen Fahrzeugen könnte ein Informationsaustausch ebenfalls sinnvoll sein, um deren Interaktionen besser steuern zu können, vgl. Kapitel 5.5 und 9.2. Der Kolonnenregler, der sich im Führungsfahrzeug befindet (siehe auch Abschnitt 8.1.2), regelt die Geschwindigkeiten und Abstände der einzelnen Fahrzeuge und ist für die Interaktionen innerhalb der Kolonne sowie für die Interaktionen mit sonstigen Fahrzeugen zuständig.

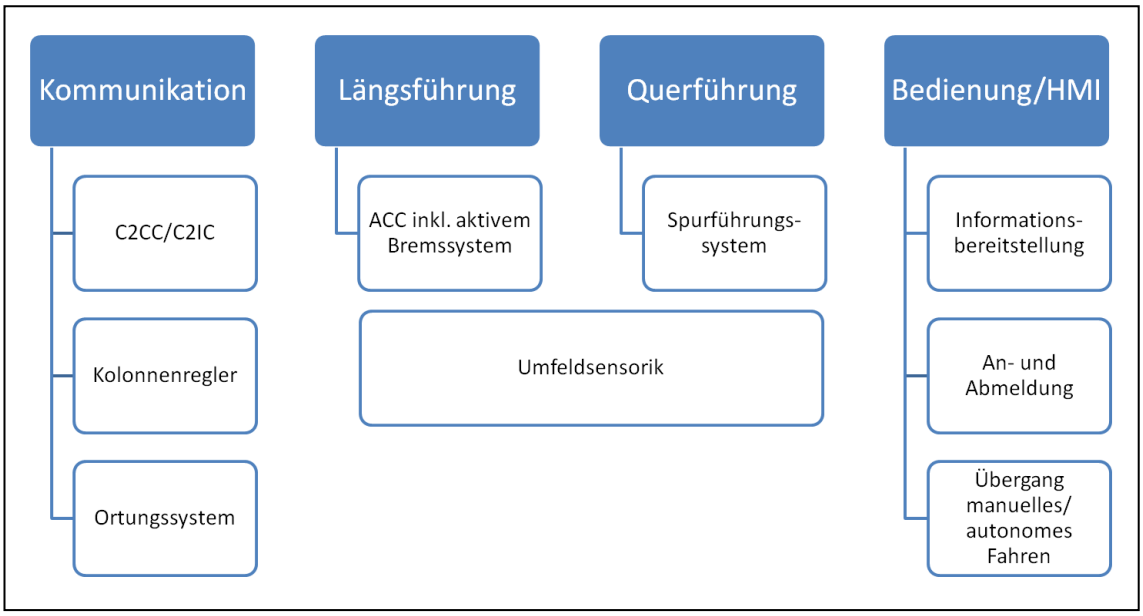


Abbildung 39: Systemübersicht zur autonomen Kolonnenfahrt.

Das Modul zur Längsführung setzt in den Folgefahrzeugen die Sollvorgaben bezüglich der Fahrgeschwindigkeit und dem Folgeabstand um und entspricht einem (FSR-)ACC-System mit der Möglichkeit einer autonomen Abbremsung mit maximaler Bremskraft, vgl. Kapitel 2.1. Die Sollgrößen werden über die C2C-Communication übermittelt und werden dann von der ACC-Regelung über das Antriebs- und Bremssystem umgesetzt. Die Anforderungen an die für die Abstandsregelung benötigte Umfeldsensorik dürften geringer sein als für ein Standard-FSR-ACC, da für die Kolonnenfahrt nur der Nahbereich und der Außenbereich (nach den Definitionen in Tabelle 1, Seite 53) relevant ist.

Für die Querführung innerhalb der Kolonne kommen verschiedene Ansätze in Betracht. Eine erste Möglichkeit wäre, dass die Lenkwinkel des Führungsfahrzeugs mit einem geschwindigkeits- und abstandsabhängigen Zeitverzug vom Folgefahrzeug umgesetzt werden. Dies hätte den Vorteil, dass theoretisch keine Umfeldsensorik zur Erfassung des Fahrstreifens notwendig wäre. Kritisch sind jedoch unter anderem das Zeitverhalten bei der Informationsverarbeitung sowie die fahrzeugindividuelle Umsetzung des Lenkwinkels. Hinzu kommt, dass die exakte Position hinter dem Führungsfahrzeug bekannt sein muss. Diese Variante der Querführung ist daher eher ungeeignet für die Kolonnenfahrt. Eine weitaus näherliegende Variante wäre die Verwendung der in Kapitel 2.2.2 vorgestellten Spurführungssysteme, die auf der videobasierten Fahrstreifenerkennung aufbauen. Nachteilig sind jedoch die bekannten Schwierigkeiten bei der Fahr-

streifenerkennung, die einen Eingriff des Fahrers in die Querführung notwendig machen könnte. Abhilfe könnte eine Erfassung und „Verfolgung“ des vorausfahrenden Fahrzeugs z.B. mittels Stereokamera schaffen (vgl. DISTRONIC PLUS mit Lenk-Assistent, Daimler-AG, 2013b). Für die Fahrzeugquerführung wird dennoch weitere Umfeldsensorik benötigt werden, sowohl für den Nahbereich – hauptsächlich seitlich und hinter dem Fahrzeug – als auch für den Außenbereich hinter dem Fahrzeug. Ohne diese erfassten Bereiche wäre ansonsten keine sichere Folgefahrt möglich, z.B. bei einem Fahrstreifenwechsel (vgl. Kapitel 9.2.1) oder beim Abkommen des Führungsfahrzeugs von der Straße.

Die Bedienung für die Kolonnenfahrt erfolgt über ein HMI. Dieses stellt dem Fahrer wichtige Informationen wie z.B. das Fahrziel des Führungsfahrzeugs und die Sollgeschwindigkeit zur Verfügung. Außerdem sollten die Fahrer über aktuell durchgeführte bzw. durchzuführende Manöver informiert werden, um unnötige Eingriffe der Fahrer zu vermeiden (z.B. wenn die Abstände an einer Einfahrt vergrößert werden oder ein Spurwechsel durchgeführt wird). Des Weiteren müssen sich die Fahrer über das HMI bei einer Kolonne an- bzw. abmelden können. Ebenfalls von großer Bedeutung ist beim Beitritt/Verlassen einer Kolonne der Übergang vom manuellen zum autonomen Fahren und umgekehrt. Der Fahrer muss mit ausreichendem zeitlichem Vorlauf darüber informiert werden, dass z.B. die Zielausfahrt demnächst erreicht wird und die Fahrzeugführung wieder übernommen werden muss. Mögliche Umsetzungen werden in den Kapiteln 2.3 und 9 diskutiert.

Für die technische Umsetzung der Längs- und Querführung wird auf die beschriebenen Systeme in Kapitel 2 sowie auf diverse Projekte wie KONVOI und SARTRE verwiesen.

8.1.2 Wirkkreis der Kolonnenfahrt

Die im vorhergehenden Abschnitt vorgestellten Module könnten wie in Abbildung 40 dargestellt zu einem Wirk- bzw. Regelkreis des Gesamtsystems aufgebaut werden. Die Informationsübertragung zwischen den Fahrzeugen und ggf. zwischen den Fahrzeugen und der Infrastruktur erfolgt dabei stets über C2C- bzw. C2I-Communication (vgl. Kapitel 5.5).

Über das HMI kann vom Fahrer des Führungsfahrzeugs die Sollgeschwindigkeit in einem gewissen Rahmen (vgl. Abschnitt 8.2) vorgegeben werden. Eine weitere Möglichkeit ist das Verwalten der Kolonne, wenn sonstige Fahrzeuge sich der Kolonne anschließen oder Folgefahrzeuge diese verlassen wollen. Fährt das Führungsfahrzeug nicht autonom bzw. wird es von einem Fahrer gesteuert, so könnten über das HMI auch (Umfeld-)Informationen dargestellt werden, die den Fahrer z.B. über die Möglichkeit eines Fahrstreifenwechsels informieren – wobei hierzu die Informationen von der Umfeldsensorik aller Fahrzeuge der Kolonne gesammelt und ausgewertet werden könnten. Des Weiteren könnten die Fahrer der Führungsfahrzeuge sich z.B. über das

HMI abmelden und den Entkoppelungsvorgang einleiten. Je nach System könnte hierzu ein manöverbasiertes Assistenzsystem oder ein manöverbasiertes Fahrzeugführungssystem zum Einsatz kommen (vgl. Kapitel 2.3.1 und 2.3.2). Gleiches gilt für sonstige Fahrzeuge, die sich der Kolonne anschließen möchten.

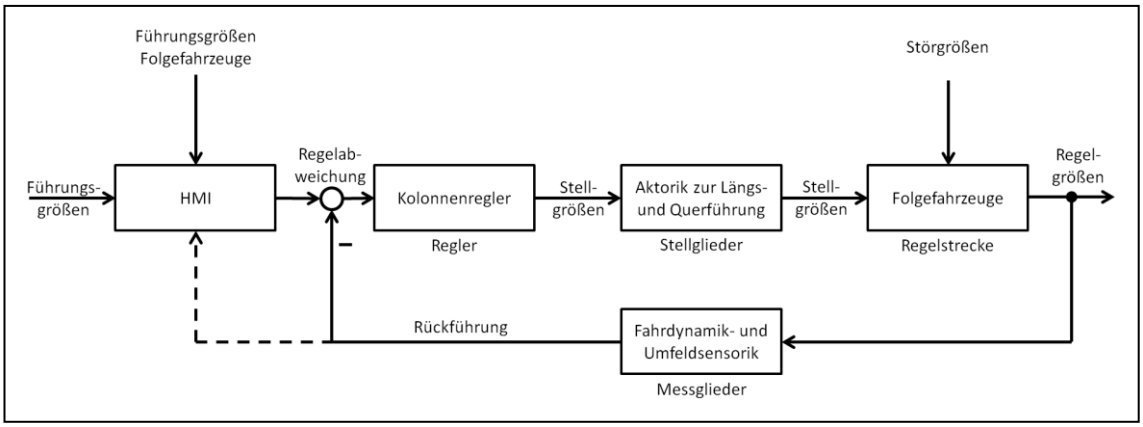


Abbildung 40: Möglicher Wirk-/Regelkreis der autonomen Kolonnenfahrt.

Die Kolonnenregelung soll vom Führungsfahrzeug übernommen werden. Der Kolonnenregler hat die Aufgabe, die einzelnen Sollgrößen für die Folgefahrzeuge zu ermitteln und sie an diese weiterzuleiten. Dies kann z.B. ein Soll-Folgeabstand sein, der wiederum von der Längsregelung des Folgefahrzeugs umgesetzt wird.

Störgrößen, die die Kolonne bzw. die Folgefahrzeuge beeinflussen, können entweder von sonstigen Fahrzeugen herrühren (z.B. an Ein- oder Ausfahrten, vgl. Abschnitt 9.2), durch Eingriffe der Fahrer der Folgefahrzeuge entstehen oder durch Umwelteinflüsse wie Seitenwind. Diese müssen durch die Längs- und Querführungssysteme der Folgefahrzeuge bzw. den Kolonnenregler entsprechend dynamisch ausgeregelt werden.

Die fahrzeuginterne Sensorik erfasst jeweils die Positionen sowie die fahrdynamischen Größen der Folgefahrzeuge und stellt diese Informationen dem Kolonnenregler zur Verfügung. Weitere Umfeldinformationen über sonstige Fahrzeuge können ebenfalls an den Kolonnenregler sowie das HMI übermittelt werden.

8.1.3 Systemsicherheit

Das allgemeine Risiko bzw. die Gefahren durch automatisierte Fahrsysteme (in allen Funktionsstufen) dürfen für die betroffenen Verkehrsteilnehmer nicht höher sein als das im aktuellen Zustand ohne diese Systeme vorhandene Gefahren- bzw. Risikoniveau (Winner et al, 2012). Dies muss auch für die rechtliche Zulassung durch anerkannte Methoden nachgewiesen werden – was laut Winner et al. (2012) mitunter die größte Herausforderung für die Zulassung von autonom agierenden Assistenzsystemen ist (vgl. Abschnitt 7.2). Durch die bisher bekannten Testmethoden (Dauerlauf etc.) ist dies

jedoch nicht wirtschaftlich nachweisbar, weshalb hier neue Methoden und Verfahren entwickelt werden müssen (vgl. Abschnitt 7.3).

Relevanz hat in diesem Zusammenhang auch die Ausfallsicherheit des Gesamtsystems. Bei den mechanischen, elektro-mechanischen und elektrohydraulischen Sub-Systemen bzw. Komponenten ist diese zulassungsbedingt bereits gegeben (z.B. Zweikreisbremsanlage und andere Rückfallebenen, vgl. Kapitel 2). Da für die Kolonnenfahrt ein übergeordnetes elektronisches System verwendet wird, muss hier speziell die funktionale Sicherheit[12] betrachtet werden. Um dieser gerecht zu werden, müssen zahlreiche Normen berücksichtigt werden, wobei für den Automobilbereich vor allem die ISO-Norm 26262 (Road vehicles – Functional safety) relevant ist.

Ein weiterer Aspekt, der ebenfalls in das Gebiet der Sicherheit fällt, ist die Bedienung des Systems durch den Menschen. Dabei stellen sich einerseits die Frage nach der Steuerung bzw. Überwachung des Führungsfahrzeugs, und andererseits die Frage nach den Folgen durch Fahrereingriffe in den Folgefahrzeugen während der Kolonnenfahrt. Das Führungsfahrzeug wird in der ersten Entwicklungsstufe i.d.R. manuell durch einen Fahrer geführt werden, der durch Assistenzsysteme wie ACC und LKS unterstützt wird (wie auch z.B. bei den Projekten KONVOI und SARTRE). Um die Sicherheit der Kolonne und der anderen Verkehrsteilnehmer sicherzustellen, sollten die Fahrer von Führungsfahrzeugen geschult werden. Des Weiteren müssen Situationen betrachtet werden, die durch Fehler beim Führungsfahrzeug bzw. dessen Fahrer entstehen, z.B. wenn dieses von der Straße abkommt (siehe Abschnitt 9).

Sehr komplex gestaltet sich auch das Verhalten der Kolonne bei Fahrereingriffen in die Fahrzeugführung der Folgefahrzeuge, wobei die anderen Folgefahrzeuge entsprechend auf die Situation reagieren müssten (z.B. durch Vergrößern des Folgeabstandes). Bei SARTRE wird, um ein bewusstes Fehlverhalten der Fahrer zu vermeiden[13], ein finanzielles Strafsystem vorgeschlagen (vgl. Robinson et al., 2010).

Aufgrund der Komplexität und dem Umfang der Sicherheitsthematik kann dieses in der vorliegenden Arbeit nicht detaillierter betrachtet werden. In den folgenden Abschnitten werden jedoch immer wieder zu berücksichtigende sicherheitskritische Aspekte aufgezeigt. Für die Kolonne und sonstige Fahrzeuge kritische Manöver, die durch das System beherrscht werden müssen, werden in Kapitel 9 betrachtet.

[12] Definition nach DIN EN 61508-4:2011 (VDE 0803-4): „Teil der Gesamtsicherheit, bezogen auf die EUC (Equipment under Control) und das EUC-Leit- oder Steuersystem, der von der korrekten Funktion des E/E/PE- (elektrisch-/elektronisch-/programmierbar elektronisch-) sicherheitsbezogenen Systems und anderer risikomindernder Maßnahmen abhängt.“ (VDE.com, 2013)

[13] Bei rein elektrischen Systemen, also Steer-by-Wire sowie Brake-by-Wire, wäre es rein theoretisch möglich, Eingriffe am Lenkrad oder an der Bremse während der Kolonnenfahrt einfach nicht umzusetzen – wobei auch sichergestellt werden müsste, dass keine Notsituation vorliegt.

8.2 Zusammensetzung autonomer Fahrzeugkolonnen

Eine Kolonne kann aus verschiedenen Fahrzeugtypen bestehen, wobei verschiedene Aspekte bezüglich der Sicherheit und der Fahrleistung betrachtet werden müssen. Für die Sicherheit spielt einerseits die Verzögerungsfähigkeit der verschiedenen Fahrzeuge eine wichtige Rolle, andererseits müssen auch die unterschiedlichen Massen von Pkw und Lkw betrachtet werden. Die Fahrzeugmasse hat, neben der verfügbaren Antriebsleistung, auch für die Beschleunigungsfähigkeit eine besondere Bedeutung.

Da das Verzögerungsvermögen von Fahrzeugen von zahlreichen Faktoren abhängig ist, besteht nicht der Anspruch, eine exakte Ermittlung des Mindestfolgeabstands durchzuführen. Vielmehr sollen anhand einer überschlägigen Berechnung die relevanten Zusammenhänge aufgezeigt werden. Auf die getroffenen Annahmen und die vernachlässigten Faktoren wird in den jeweiligen Kapiteln eingegangen.

Für die Berechnungen werden exemplarisch drei Fahrzeugtypen festgelegt, siehe Kapitel 8.2.1. Aus der zulässigen Kolonnenlänge kann abgeleitet werden, wie viele Fahrzeuge in Kolonne fahren können. Anschließend wird auf die theoretische Beschleunigungs- und Verzögerungsfähigkeit der verschiedenen Fahrzeugtypen eingegangen. Mit diesen Grundlagen wird dann für die verschiedenen möglichen Kolonnenzusammensetzungen jeweils der (sicherheitsbedingte) Mindestfolgeabstand ermittelt. Hierzu werden zuerst homogene Kolonnen, die jeweils nur aus einem der drei Fahrzeugtypen bestehen, betrachtet, bevor ein Blick auf inhomogene Kolonnen geworfen wird. Des Weiteren werden jeweils verschiedene zu berücksichtigende Aspekte bezüglich der Kolonnenzusammensetzung aufgezeigt.

8.2.1 Definition der betrachteten Fahrzeugtypen

Für die Ermittlung der Beschleunigungs- und Verzögerungsfähigkeit müssen verschiedene Annahmen getroffen werden. Exemplarisch werden daher drei verschiedene Fahrzeugtypen festgelegt – Pkw, Lkw und Reisebusse – die im Folgenden genauer vorgestellt werden. Bei jedem Fahrzeugtyp wird weiter zwischen „Nullfall“, „Unterer Grenzfall“ und „Oberer Grenzfall“ unterschieden, wobei der untere Grenzfall besonders ungünstige Kombinationen der Kenngrößen im Vergleich zum Nullfall repräsentiert. Beim oberen Grenzfall werden entsprechend günstigere Kombinationen als beim Nullfall betrachtet. Die gewählten Daten sind in Anlage 1 zu finden.

Bei den *Pkw* werden Kleinwagen unter der Annahme vernachlässigt, dass diese nur sehr geringe Strecken auf Autobahnen zurücklegen und dass aufgrund der Systemkosten in diesem Preissegment keine Nachfrage vorhanden sein wird. Für die Gruppe der Pkw wird ein Fahrzeug der Kompaktklasse („Golf-Klasse“) festgelegt, da diese in Europa erfahrungsgemäß eine hohe Verbreitung haben. Der „Nullfall“ bei den Pkw entspricht einem mit ein bis zwei Personen besetzten Fahrzeug mit einer Masse von 1400

kg und einer Motorleistung von 65 kW. Als Beispiel kann ein VW Golf dienen. Der „untere Grenzfall“, der die Untergrenze der Beschleunigungsfähigkeit festlegt, entspricht z.B. einem voll besetztem VW Golf Variant mit ca. 1700 kg Gesamtmasse und einer Einstiegsmotorisierung mit einer Leistung von ca. 55 kW. Bei der Fahrzeuglänge werden für Pkw 5 m angesetzt.

Aufgrund der vielfältigen Fahrzeugklassen bei den Nutzfahrzeugen (*Lkw*), wird für die autonome Kolonnenfahrt die Annahme getroffen, dass vor allem Lastkraftwagen und Sattelzugmaschinen bis 40 Tonnen Gesamtgewicht für den Einsatz im Fernverkehr und in Fahrzeugkolonnen in Frage kommen. Bei diesen Fahrzeugen kann von einem Leistungsgewicht von 6 bis 9 kW pro Tonne ausgegangen werden, wobei die 9 kW/t vor allem für Gegenden mit bergigen Autobahnen und windreiche Strecken gewählt werden (vgl. Hoepke et al., 2013). Für die Fahrzeuglängen der hier betrachteten Lkw werden die in der EU maximal zulässigen 18,75 m angesetzt. Repräsentiert wird die festgelegte Fahrzeugklasse der Lkw z.B. durch die verschiedenen verfügbaren Versionen des Mercedes-Benz Actros für den Fernverkehr.

Bei der Gruppe der *Reisebusse* gibt es, wie bei den Pkw und Lkw, ebenfalls zahlreiche Fahrzeugversionen. Reisebusse (im Folgenden oft auch nur als „Bus“ bezeichnet) werden hier separat betrachtet, da diese oft eine höhere zulässige Geschwindigkeit als Lkw haben (z.B. 100 km/h im Vergleich zu 80 km/h). Reisebusse haben i.d.R. ein zulässiges Gesamtgewicht von 18 bis 26 t bei ähnlichen Motorleistungen wie die festgelegten Lkw-Varianten. Bei der Fahrzeuglänge werden für Busse 13 m angesetzt. Als Fahrzeugbeispiele kann z.B. auf die Reisebusse der Firma Neoplan verwiesen werden (z.B. Starliner, Tourliner, Jetliner).

Für die weiteren Kenngrößen, die für die Ermittlung des Beschleunigungs- und Verzögerungsfähigkeit notwendig sind, werden sowohl Erfahrungswerte als auch Literaturwerte verwendet, wie sie z.B. bei Haken (2008) und Hoepke (2013) zu finden sind (siehe Anlage 1).

8.2.2 Festlegung der maximalen Kolonnenlänge

Die Kolonnenlänge hat einen Einfluss auf die Akzeptanz der nicht gekoppelten Verkehrsteilnehmer. Probandenversuche bei SARTRE zeigen, dass eine Kolonne bestehend aus einem Führungs- und 15 Folgefahrzeugen gerade noch akzeptiert wird (vgl. Larburu et al., 2010). Wird ein Lkw als Führungsfahrzeug (z.B. 18,75 m) und 15 folgende Pkw (ca. 5 m) mit einem Folgeabstand von ca. 5 m betrachtet, so ergibt sich eine Gesamtlänge der Kolonne von etwa 170 m. Ein weiterer Grund könnte die Reichweite der C2C-Communication (vgl. Kapitel 5.5) sein, da innerhalb der Kolonne eine stabile und echtzeitfähige Kommunikation sichergestellt werden muss (weshalb z.B. kein Multi-Hop-Charakter sinnvoll wäre), wobei die Grenze hierfür deutlich über den festgelegten 170 m liegen wird.

Da an dieser Stelle keine weiteren Anhaltswerte angegeben werden können, wird die maximale Kolonnenlänge auf die ermittelten 170 m festgelegt. Abhängig hiervon, und vom gewählten Folgeabstand, ergibt sich die Anzahl der zulässigen Fahrzeuge.

8.2.3 Betrachtung der Beschleunigungs- und Verzögerungsfähigkeit

Unter der Beschleunigungsfähigkeit kann auch die negative Beschleunigung verstanden werden – zur besseren Verständlichkeit wird hier unter der Beschleunigungsfähigkeit die positive, und unter der Verzögerungsfähigkeit die negative Beschleunigung betrachtet.

8.2.3.1 Beschleunigungsfähigkeit

Die Beschleunigung einer Kolonne sollte sich nach der des „schwächsten“ Fahrzeugs richten, um ein Aufziehen der Kolonne zu verhindern. Weitere Aspekte bei der Wahl des Beschleunigungsbereichs für die jeweilige Kolonne sind Energieverbrauch und Komfort (siehe auch Kapitel 10.2 und 10.5). Die Beschleunigungsfähigkeit ergibt sich aus der noch verfügbaren Motorleistung bei der aktuell zu überwindenden Fahrwiderstandsleistung. Der Fahrwiderstand (linke Seite der Gleichung in Form der Fahrwiderstandsleistung) setzt sich aus dem Rollwiderstand, der Hangabtriebskraft sowie dem Luft- und Beschleunigungswiderstand zusammen. Auf eine Herleitung der Gleichung wird an dieser Stelle verzichtet, es wird auf die aufgeführte Literatur verwiesen (z.B. Haken (2008) und Hoebke (2013)).

Bei gegebener Motorleistung (rechte Seite der Gleichung) ergibt sich die Gleichung

$$m * g * \left(f_R * \cos(\alpha) + \sin(\alpha) + (1+\epsilon) * \frac{a}{g}\right) * v + \frac{\rho}{2} * c_W * A * v^3 = P_M * \eta_A * (1-\lambda_A)$$

mit

m Fahrzeugmasse

g Ortsfaktor der Gewichtskraft (9,81 m/s^2)

f_R Rollwiderstandsbeiwert durch Reifen-Fahrbahn-Kontakt

α Steigungswinkel der Strecke

ε Drehmassenzuschlagsfaktor für alle rotierenden Fahrzeugkomponenten

a Fahrzeuglängsbeschleunigung

v Fahrzeuggeschwindigkeit

ρ Luftdichte (1,23 kg/m^3)

c_W Luftwiderstandsbeiwert des Fahrzeugs

A Stirnfläche des Fahrzeugs

P_M abgegebene Motorleistung

η_A Wirkungsgrad des Antriebsstrangs

λ_A Antriebsschlupf der angetriebenen Räder.

Wird die Gleichung nach der Beschleunigung a aufgelöst, so kann die resultierende Beschleunigung z.B. in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit v und der Steigung α berechnet werden, Abbildung 41. Bei großen Geschwindigkeiten und Steigungen kann die Motorleistung nicht ausreichend sein, weshalb sich hier keine bzw. eine negative Beschleunigung einstellen wird (im gewählten Wertebereich nicht mehr sichtbar). Mit der Fahrwiderstandsgleichung kann für jede gewählte Fahrzeuggruppe und die verschiedenen Grenzfälle die resultierende Beschleunigung ermittelt werden.

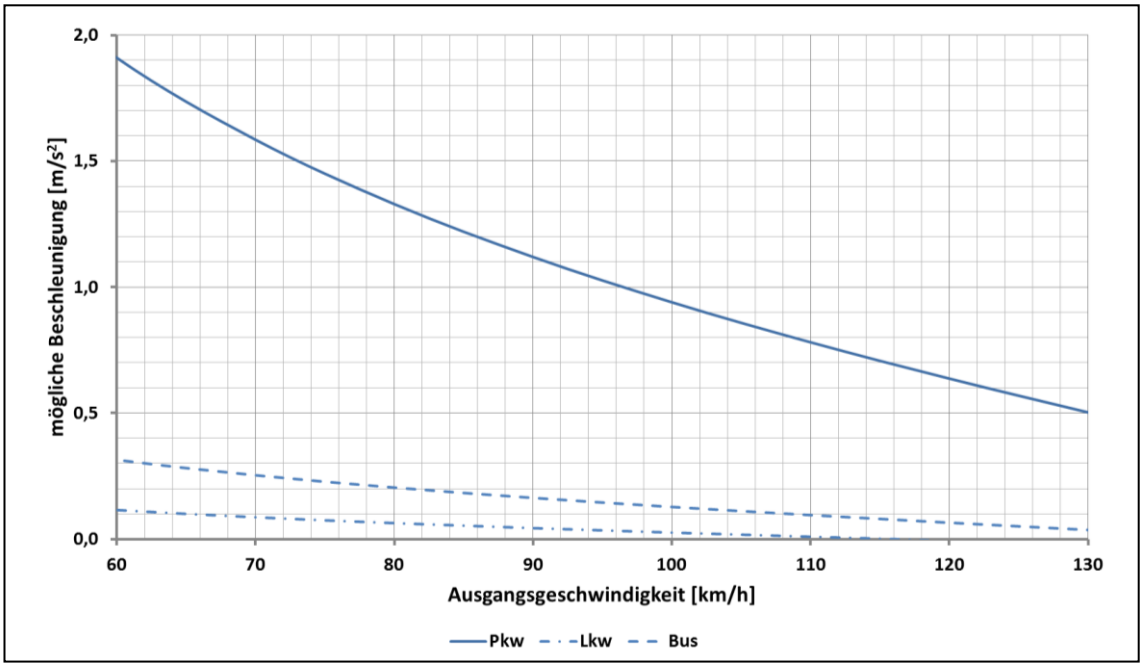


Abbildung 41: Beschleunigungsfähigkeit in der Ebene (jeweils Fahrzeug-Nullfall).

Die ermittelten Beschleunigungen können jedoch nur als Anhaltswerte betrachtet werden, da zahlreiche Annahmen und Vereinfachungen getroffen werden müssen. Es wird durch die konstant gewählte maximale Motorleistung davon ausgegangen, dass diese durch eine entsprechende Gangwahl des Automatikgetriebes stets erreicht werden kann. Der Drehmassenzuschlagsfaktor wird bei der Berechnung zusätzlich als konstant angenommen, da dieser sich bei hohen Gängen nur geringfügig unterscheidet bzw. der Einfluss aufgrund der Getriebeübersetzung geringer wird. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass der Kraftschluss zwischen Fahrbahn und Reifen ausreichend groß ist – was vor allem bei geringen Kraftschlussbeiwerten und abgefahrenen Reifen nicht mehr vernachlässigbar wäre. Hier kann jedoch davon ausgegangen werden, dass bei kritischen Straßenverhältnissen wie Schneefall oder starkem Regen die Kolonne aufgelöst werden wird. Außerdem werden dynamische Achslastveränderungen in Steigungen sowie durch die Fahrzeugbeschleunigung vernachlässigt. Für die betrachteten Geschwindigkeitsbereiche und die i.d.R. vorhandenen Steigungen auf Autobahnen

sollten diese Effekte auch nur einen geringen Einfluss auf die Kolonnenfahrt haben. Durch aerodynamische Effekte, siehe Kapitel 10.2.1.1, würde sich die Beschleunigungsfähigkeit verbessern, da der Luftwiderstand durch die Kolonnenfahrt reduziert wird. Für eine genauere Ermittlung der Beschleunigungsfähigkeit wären aufwändigere Simulationen und weitere Fahrzeugdaten notwendig – was jedoch nicht das Ziel der vorliegenden Arbeit ist.

Das Beschleunigungsvermögen spielt vor allem für die Konstantfahrt in Steigungen eine große Rolle. Daraus kann z.B. auch abgelesen werden, ob das Fahrzeug die Steigung mit der aktuellen Geschwindigkeit befahren kann – oder ob es langsamer wird, da die Fahrwiderstandsleistung größer als die abgegebene Motorleistung ist. Das mögliche Verhalten von Kolonnen in Steigungen wird in Abschnitt 9.1.3.1 betrachtet. Bei der Beschleunigungsfähigkeit zeigen sich aufgrund der verschiedenen Fahrzeugmassen deutliche Unterschiede zwischen Pkw, Lkw und Bussen. Bei Kolonnen, die aus den Typen Pkw, Lkw und Bus bestehen, muss dies bei Beschleunigungsvorgängen vom Kolonnenregler entsprechend berücksichtigt werden.

8.2.3.2 Verzögerungsfähigkeit

Die Verzögerungsfähigkeit der verschiedenen Fahrzeugtypen spielt für die Sicherheit einer Kolonne eine wichtige Rolle, da sich aus ihr der umsetzbare Mindestfolgeabstand ergibt. Als Größe für die Verzögerungsfähigkeit wird der Anhalteweg bei einer Gefahrenbremsung betrachtet, der sich aus zwei wesentlichen Anteilen zusammensetzt – dem Reaktionsweg s_0 und dem eigentlichen Bremsweg s_B. An dieser Stelle wird ebenfalls auf die Herleitung verzichtet und auf die aufgeführte Literatur (Haken, 2008) verwiesen.

Der Reaktionsweg ist abhängig von der Ausgangsgeschwindigkeit und der Zeit, bis das Bremsmoment an den Rädern umgesetzt wird. Es wird davon ausgegangen, dass das Fahrzeug während der Reaktionszeit sich mit konstanter Geschwindigkeit weiterbewegt und nicht verzögert:

$$s_0 = v_0 * (t_R + t_U + t_A + t_S * 0{,}5)$$

mit

- s_0 Reaktionsweg
- v_0 Geschwindigkeit zu Beginn des Bremsmanövers
- t_R Reaktionszeit des Systems (bei manueller Bremsbetätigung die Reaktionszeit des Fahrers)
- t_U Umsetzzeit (Zeit, die der Fahrer zum Umsetzen seines Fußes auf das Bremspedal benötigt, entfällt für die autonome Bremsung)
- t_A Ansprechzeit (Zeit, bis die Bremsbeläge an der Bremsscheibe anliegen)
- t_S Schwellzeit (Zeit, bis der maximale Bremsdruck aufgebaut ist).

Der Bremsweg ist ebenfalls von der Ausgangsgeschwindigkeit abhängig. Hinzu kommen der Einfluss der Fahrzeugmasse und der Fahrwiderstände, wobei diese deutlich kleiner sind als die Bremskraft selbst und in erster Näherung auch vernachlässigt werden könnten. Die Abbremsung ist auch wesentlich vom Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn abhängig.

Der Bremsweg eines Fahrzeugs ergibt sich zu:

$$s_B = \frac{m}{\rho * (c_W - \mu * c_A) * A} * \ln\left(\frac{\mu * cos(\alpha) + sin(\alpha) + \frac{\rho}{2 * m * g} * (c_W - \mu * c_A) * A * v_0^2}{\mu * cos(\alpha) + sin(\alpha)}\right)$$

mit

s_B Bremsweg

v_0 Geschwindigkeit zu Beginn des Bremsmanövers

m Fahrzeugmasse

ρ Luftdichte (1,23 kg/m^3)

c_W Luftwiderstandsbeiwert

c_A Auftriebsbeiwert

A Stirnfläche

μ Kraftschlussbeiwert

α Steigung.

Wie bei der Ermittlung des Beschleunigungsvermögens sollen hier nur die grundlegenden Zusammenhänge aufgezeigt werden. Der berechnete Anhalteweg dient nur als Näherungswert. Es wird eine ideale Bremskraftverteilung in Abhängigkeit der dynamischen Achslasten und eine Ausnutzung der maximalen Kraftschlussbeanspruchung angenommen. Des Weiteren wird der zeitliche Verzug des Bremskraftaufbaus in der Reifenaufstandsfläche in Abhängigkeit des Längsschlupfes vernachlässigt und zudem eine lineare Zunahme des Bremsdrucks angenommen.

Aus Reaktions- und Bremsweg ergibt sich der gesamte Anhalteweg bei einer Gefahrenbremsung für ein Folgefahrzeug. In Abbildung 42 ist dieser für die definierten Fahrzeuge in Abhängigkeit vom Kraftschlussbeiwert dargestellt.

Bei der Betrachtung der Anhaltewege zeigt sich, dass sich diese für die verschiedenen Fahrzeugtypen, auch bei unterschiedlichen Randbedingungen, nur geringfügig unterscheiden. Besonders deutlich zeigt sich jedoch die Verlängerung des Anhaltewegs bei geringeren Kraftschlussbeiwerten. Die ermittelten Anhaltewege für die betrachteten Fahrzeuggruppen Pkw, Lkw und Reisebus werden in den folgenden Abschnitten für die Festlegung der Mindestfolgeabstände innerhalb der Kolonne verwendet.

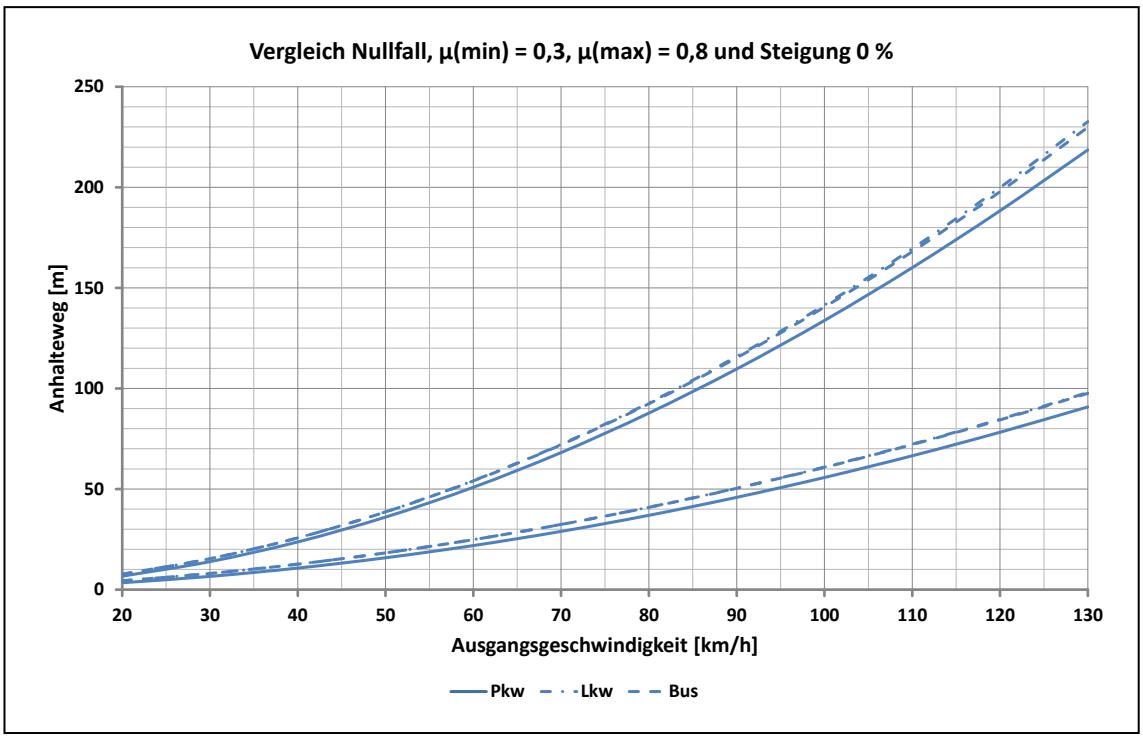


Abbildung 42: Anhalteweg in Abhängigkeit vom Kraftschlussbeiwert µ bei Steigung 0 % für Pkw, Lkw und Bus (Lkw und Bus fast deckungsgleich).

8.2.3.3 Ermittlung des Folgeabstands

Auf Basis der Verzögerungsfähigkeit, die anhand des Anhalte- bzw. Bremswegs bei einer Vollbremsung betrachtet wurde, kann für jede Kombination von vorausfahrendem und folgendem Fahrzeug ein Folgeabstand ermittelt werden. Der ermittelte Folgeabstand entspricht dem technisch umsetzbaren (Mindest-)Abstand, damit die Fahrzeuge am Ende der Abbremsung noch einen sicherheitsbedingten Abstand haben.

Der Folgeabstand kann z.B. aus der Betrachtung von Reaktions- und Bremswegen ermittelt werden, Abbildung 43. Die beiden Fahrzeuge bewegen sich zum Zeitpunkt t_0 mit identischer Geschwindigkeit und Fahrzeug 1 führt eine Vollbremsung mit dem individuellen Bremsweg $s_{B,1}$ durch. Fahrzeug 2 folgt Fahrzeug 1 mit dem Abstand d_F. Bei Einleitung der Vollbremsung z.B. durch ein Notbremssystem könnte dies auch sofort über C2CC an die Folgefahrzeuge weitergeleitet werden, wodurch die Reaktionszeit der Folgefahrzeuge verkürzt werden könnte. Bei Fahrzeug 1 wird jedoch vereinfacht nur der Bremsweg betrachtet. Zum Zeitpunkt t_1 ist die Vollbremsung beendet und beide Fahrzeuge sind im Abstand d_S zum Stehen gekommen. Der Anhalteweg von Fahrzeug 2 setzt sich aus den im vorhergehenden Abschnitt eingeführten Reaktionsweg $s_{0,2}$ und dem Bremsweg $s_{B,2}$ zusammen.

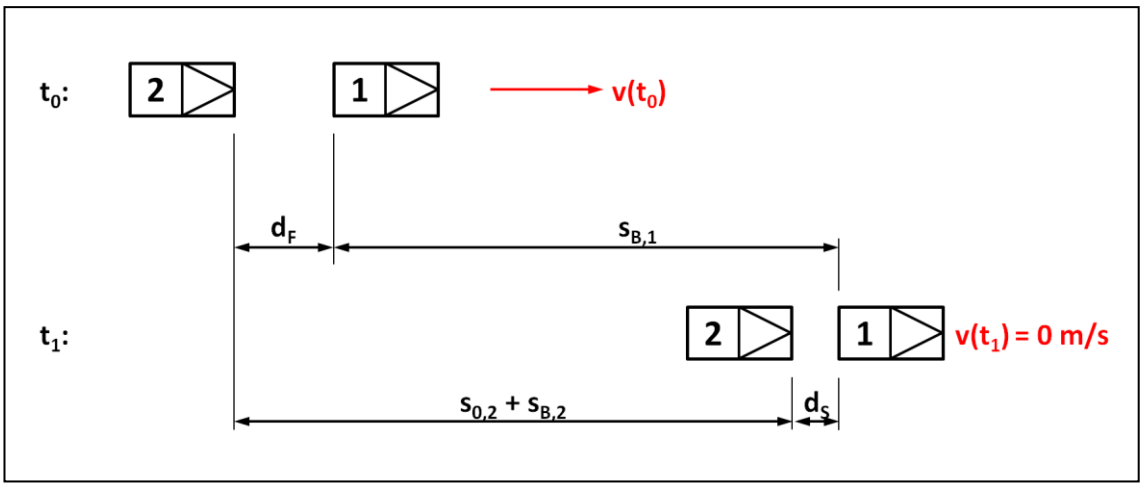


Abbildung 43: Ermittlung des Folgeabstands in Abhängigkeit von den fahrzeugindividuellen Reaktions- und Bremswegen.

Daraus ergibt sich die Gleichung für den Folgeabstand zu:

$$s_{B,1} + d_F = s_{0,2} + s_{B,2} + d_S \quad \text{bzw.} \quad d_F = s_{0,2} + s_{B,2} + d_S - s_{B,1}$$

mit

d_F Folgeabstand von Fahrzeug 2 zu Fahrzeug 1 (Netto-Abstand)

$s_{B,i}$ Bremsweg von Fahrzeug i (i = 1,2)

$s_{0,2}$ Reaktionsweg von Fahrzeug 2

d_S gewünschter Netto-Abstand am Ende der Vollbremsung.

Damit kann für jede Fahrzeugkombination der einzuhaltende Folgeabstand ermittelt werden. Einfluss auf den Folgeabstand haben hauptsächlich die fahrzeugspezifischen Faktoren (vgl. Abschnitt 8.2.3.2), die Geschwindigkeit sowie der gewählte Netto-Abstand am Ende der Vollbremsung. Der zu wählende Folgeabstand wird jeweils in den Kapiteln 8.2.4 und 8.2.5 betrachtet.

Wird eine Abbremsung z.B. durch das Erkennen eines Stauendes oder eines Pannenfahrzeugs rechtzeitig eingeleitet – egal ob vom Fahrer oder von Assistenzsystemen – so könnte durch den (Not-)Bremsassistenten eine Abbremsung mit konstanter und einheitlicher Verzögerung durchgeführt werden, da der Abstand zum Hindernis durch die vorhandene Umfeldsensorik erfasst und ausgewertet wurde. Ist der verbleibende Weg zum Hindernis nicht mehr ausreichend, um vor diesem zum Stehen zu kommen, so sollte stets die maximale Verzögerung der Kolonnenfahrzeuge eingestellt werden. Ein Auffahren der Folgefahrzeuge – wenn auch mit geringen Geschwindigkeitsunterschieden – wäre dann allerdings nicht mehr auszuschließen. Um dies zu verhindern, besteht ggf. noch die Möglichkeit eines – autonom durchgeführten – Ausweichmanövers, beginnend bei den führenden Fahrzeugen der Kolonne. Dabei muss durch die Umfeldsensorik und C2C-Communication eine Kollision mit anderen Fahrzeugen ausgeschlossen werden. Durch das Ausweichmanöver der vorderen Fahrzeuge haben

dann wiederum auch die folgenden Fahrzeuge einen längeren Bremsweg zur Verfügung, um Kollisionen zu vermeiden.

Zu berücksichtigen sind auch noch Aspekte wie z.B. ein sich ändernder Kraftschlussbeiwert entlang des Bremsweges, bedingt durch z.B. überfrierende Nässe oder Aquaplaning, auf die aber in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen wird.

8.2.4 Betrachtung homogener Kolonnen

Wie zu Beginn von Kapitel 8.2 erwähnt, wird im Folgenden zuerst eine homogene Kolonnenzusammensetzung betrachtet. Es wird jeweils auf die maximale Fahrzeuganzahl und die fahrdynamischen Grenzen – also Folgeabstand und zulässige Beschleunigungswerte – eingegangen. Zudem werden für jeden Kolonnentyp kurz mögliche Konzepte vorgestellt.

8.2.4.1 Lkw-Kolonnen

In Verbindung mit der Ausstattungspflicht von ACC, Notbrems- und Spurhalteassistenten wäre der (technische) Weg zur Kolonnenfahrt für Nutzfahrzeuge nicht mehr weit. Zudem wurden Lkw-Kolonnen bereits in verschiedenen Projekten betrachtet und umgesetzt, zuletzt im Projekt KONVOI (vgl. Kapitel 6.2.1). Die Kolonnenfahrt bietet für den Straßengüterverkehr, insbesondere für den Fernverkehr, ein großes Potential zur Effizienzsteigerung, die letztendlich auch Auswirkungen auf den gesamten Verkehrsablauf und den Energiebedarf haben könnten, siehe Kapitel 10. Aufgrund des geringeren Energiebedarfs – und den damit geringeren Transportkosten – könnten auch hohe Ausstattungsraten vor allem im Fernverkehr erzielt werden. Eine Einführung der Kolonnenfahrt ist aufgrund dieser Tatsachen zuerst für Lkw-Kolonnen zu erwarten. Hinzu kommt, dass die Berufskraftfahrer entsprechend geschult werden könnten.

Die Kolonnen könnten gezielt von einzelnen Transportunternehmern losgeschickt werden. Effektiver dürfte jedoch eine Unternehmen-unabhängige Kolonnenbildung auf den Autobahnen sein, da im Fernverkehr meist bestimmte Routen verwendet werden und die Lkw über lange Strecken ohnehin in „Kolonnen“ fahren. Da Führungs- und Folgefahrzeug unterschiedlich stark profitieren, wäre ein einheitliches Vergütungs- bzw. Bezahlsystem sinnvoll. Die Kolonnenfahrt könnte letztendlich auch einen Einfluss auf die zulässigen Lenkzeiten haben.

Geschwindigkeitswahl und Folgeabstand

Für Lkw gelten in Europa unterschiedliche Geschwindigkeitsbeschränkungen. In Deutschland sind auf Autobahnen 80 km/h vorgeschrieben, während z.B. in Frankreich

90 km/h gültig sind. Die Geschwindigkeitswahl für Lkw wird sich also an den geltenden Tempolimits orientieren.

Die Beschleunigungsfähigkeit der Kolonnenteilnehmer kann, wie in Kapitel 8.2.3.1 vorgestellt, näherungsweise berechnet werden. Genauere Ergebnisse, abhängig vom aktuellen Fahrzustand, können mit den exakten Fahrzeugdaten durch das Fahrzeug selbst ermittelt werden. Die Beschleunigungsgrenzen können dann in erster Linie allgemein wie z.B. beim ACC gewählt werden (vgl. auch ISO 15622 und ISO 22179, Kapitel 2.1.1). Wenn diese nicht durch alle Fahrzeuge erreicht werden können, so sollte sich die Kolonne an der Beschleunigungsfähigkeit des „schwächsten“ Kolonnenteilnehmers orientieren – oder aber auch weitere Strategien verfolgen, die in Kapitel 9.1.3.1 vorgestellt werden.

Der Folgeabstand kann, wie in Abschnitt 8.2.3.3 beschrieben, ermittelt werden. Für eine Lkw-Kolonne kann für die in Kapitel 8.2.1 bzw. in Anlage 1 definierten Fahrzeugtypen bei 80 km/h in der Ebene ein Folgeabstand im Bereich von 7,3 bis 13,7 m ermittelt werden, siehe Abbildung 44.

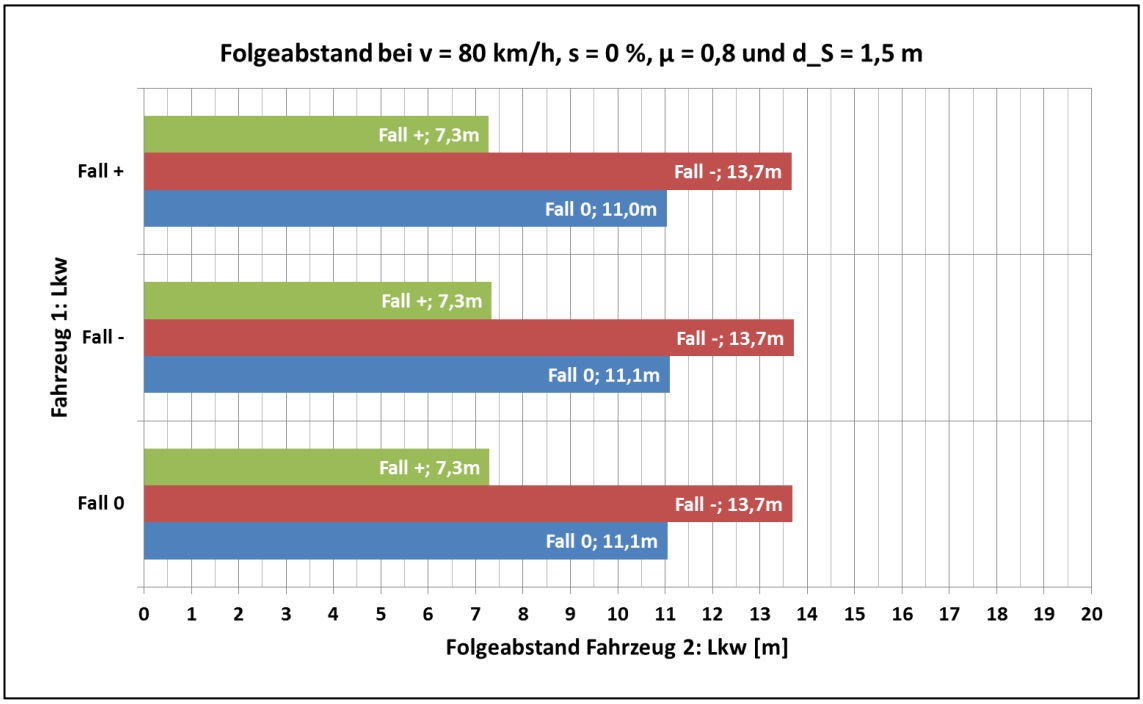

Folgeabstand bei v = 80 km/h, s = 0 %, μ = 0,8 und d_S = 1,5 m
Fahrzeug 1: Lkw
Fall +
Fall -
Fall 0
Fall +; 7,3m
Fall -; 13,7m
Fall 0; 11,0m
Fall +; 7,3m
Fall -; 13,7m
Fall 0; 11,1m
Fall +; 7,3m
Fall -; 13,7m
Fall 0; 11,1m
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
Folgeabstand Fahrzeug 2: Lkw [m]

Abbildung 44: Ermittelte Folgeabstände für eine Lkw-Kolonne.

Kolonnenlänge

Bei der in Kapitel 8.2.2 festgelegten maximalen Kolonnenlänge von 170 m bei einem Folgeabstand von im Mittel ca. 10 m bei 80 km/h könnte eine Kolonne aus sechs Sattelzügen mit einer Länge von jeweils 18,75 m bestehen. Je nach Fahrzeugkombinationen sind auch mehr Fahrzeuge möglich.

Weitere Aspekte

Bei reinen Lkw-Kolonnen sollten Überholvorgänge aufgrund der geringen Geschwindigkeitsdifferenzen vermieden werden. Zudem wäre ein Überholvorgang der gesamten Kolonne (bei mehr als zwei Lkw) in den seltensten Fällen möglich, ohne die Kolonne aufzulösen. Weitere Situationen, wie z.B. Fahrten in Steigungen, werden in Abschnitt 9.1.3 betrachtet.

8.2.4.2 Reisebus-Kolonnen

Der Bedarf an reinen Reisebus-Kolonnen dürfte sicherlich deutlich kleiner ausfallen als bei Nutzfahrzeugen im Fernverkehr. Sie bieten sich jedoch bei größeren Ausfahrten eines Reiseveranstalters an, bei denen oftmals mehr als zwei Busse zur gleichen Zeit abfahren und ein identisches Reiseziel haben. Für den Reiseunternehmer könnten die Energiekosten durch einen geringeren Verbrauch reduziert werden. Zudem könnten sich Vorteile durch Anpassungen der zugelassenen Lenkzeiten ergeben. Wie bei den Lkw-Kolonnen könnten die Berufskraftfahrer entsprechend geschult werden. Da bei dieser Betrachtung lediglich Fahrzeuge eines Unternehmers eingesetzt werden, wäre hierfür kein Vergütungssystem notwendig.

Geschwindigkeitswahl und Folgeabstand

Für Busse liegt die Geschwindigkeitsbegrenzung i.d.R. bei 80 bis 100 km/h (BFM, 2005). Wie bei Lkw-Kolonnen orientiert sich die Geschwindigkeitswahl also an den geltenden Begrenzungen. Bei der Betrachtung der Beschleunigungsfähigkeit gelten die Aussagen für Lkw-Kolonnen aus dem vorhergehenden Abschnitt 8.2.4.1. Hier ist lediglich noch anzumerken, dass Reisebusse aufgrund eines günstigeren Leistungsgewichts i.d.R. eine höhere Beschleunigungsfähigkeit haben bzw. auch größere Steigungen ohne Geschwindigkeitsverlust bewältigen können. Aufgrund der höheren Geschwindigkeit ergibt sich unter sonst gleichen Bedingungen ein geringfügig höherer Folgeabstand als bei Lkw, Abbildung 45. Der Folgeabstand für Reisebusse liegt je nach Fahrzeugkombination bei 100 km/h in der Ebene im besten Fall bei 8,7 m, bei einer ungünstigen Kombination bei 16,8 m.

Kolonnenlänge

Bei einem Folgeabstand von im Mittel ca. 12 m bei 100 km/h könnte eine Kolonne aus sieben Reisebussen mit einer mittleren Länge von ca. 13 m bestehen. Je nach Fahrzeugkombinationen sind auch mehr Fahrzeuge möglich.

Weitere Aspekte

Im Gegensatz zu Lkw-Kolonnen können Bus-Kolonnen aufgrund der höheren Geschwindigkeit prinzipiell Überholvorgänge durchführen. Ohne ein Aufteilen der Kolonne

wäre dies jedoch nur für kurze Kolonnen aus zwei bis drei Fahrzeugen durchführbar, da mit der Länge der Kolonne die Wahrscheinlichkeit eines freien Nachbarfahrstreifens stark sinkt. Weitere Situationen, wie z.B. Fahrten in Steigungen, werden in Abschnitt 9.1.3 betrachtet.

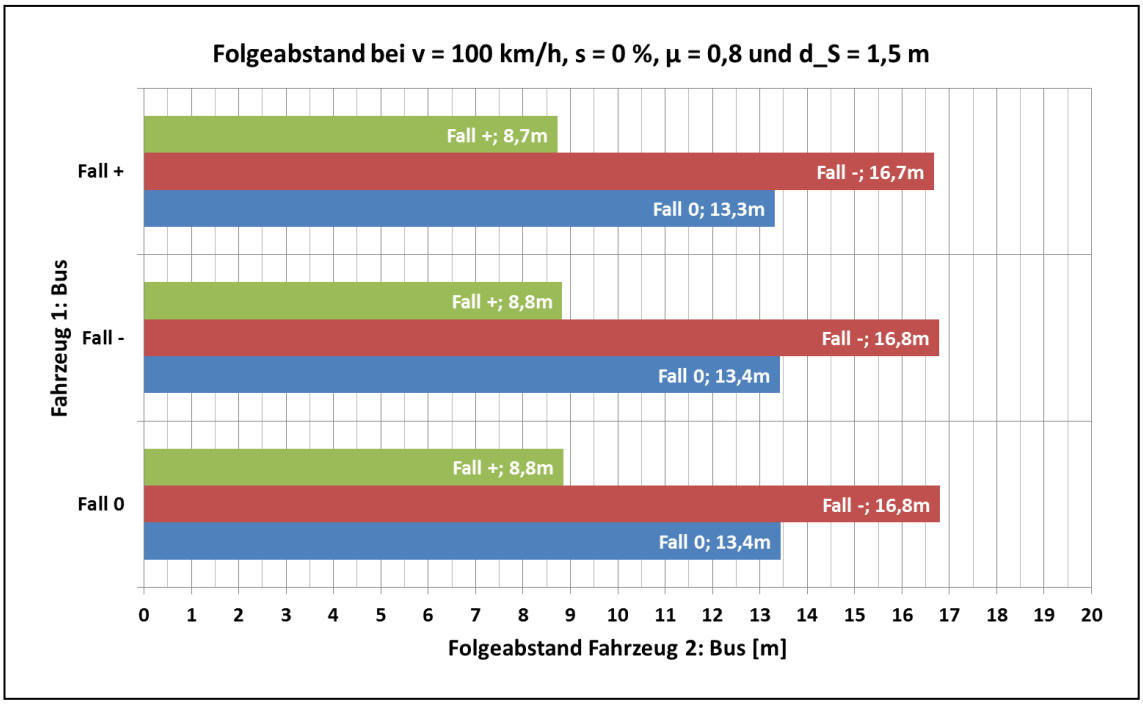

Folgeabstand bei v = 100 km/h, s = 0 %, μ = 0,8 und d_S = 1,5 m
Fahrzeug 1: Bus
Fall +
Fall +; 8,7m
Fall -; 16,7m
Fall 0; 13,3m
Fall -
Fall +; 8,8m
Fall -; 16,8m
Fall 0; 13,4m
Fall 0
Fall +; 8,8m
Fall -; 16,8m
Fall 0; 13,4m
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
Folgeabstand Fahrzeug 2: Bus [m]

Abbildung 45: Ermittelte Folgeabstände für eine Reisebus-Kolonne.

8.2.4.3 Pkw-Kolonnen

Die Ausstattung von Pkw mit den Systemen zur Kolonnenfahrt unterliegt anderen Randbedingungen als bei Nutzfahrzeugen oder Reisebussen. Im Gegensatz zur Gruppe der Berufskraftfahrern wären Schulungen schwieriger umzusetzen und auch schwieriger kontrollierbar, da private Pkw auch von anderen Personen mit gültiger Fahrerlaubnis genutzt werden dürfen. Je nach Systemkosten würde die Ausstattungsrate bei rein privat genutzten Pkw vermutlich eher gering ausfallen, da das System sich nur für Fahrer rentieren würde, die einen großen Streckenanteil auf Autobahnen zurücklegen. Eine weitere Zielgruppe könnten Personen sein, die z.B. an Wochenenden regelmäßig längere Strecken im Freizeitverkehr zurücklegen. Auch für Dienst- bzw. Firmenfahrzeuge, z.B. von Vertretern, könnte das System wirtschaftlich interessant sein, da die Zeit während der Fahrt anderweitig genutzt werden könnte. Wie bei Lkw-Kolonnen wäre ein Vergütungssystem sinnvoll.

Geschwindigkeitswahl und Folgeabstand

Mit Ausnahme von Deutschland liegen die Geschwindigkeitsbeschränkungen für Pkw auf europäischen Autobahnen und Schnellstraßen i.d.R. bei 100 bis 130 km/h. In

Deutschland ist auf Autobahnen ohne ausgewiesene Geschwindigkeitsbeschränkung eine Richtgeschwindigkeit von 130 km/h vorgegeben. Im Gegensatz zur Situation bei Lkw und Bussen wäre in diesem Fall eine Begrenzung der Geschwindigkeit für Pkw-Kolonnen auf 130 km/h sinnvoll. Ansonsten werden die geltenden Regelungen berücksichtigt. Aufgrund der geringeren Schwelldauer im Vergleich zu pneumatischen Bremssystemen bei Lkw, ergeben sich für Pkw geringere Folgeabstände bei gleicher Geschwindigkeit. Bei maximal 130 km/h in der Ebene liegen diese für die betrachteten Fahrzeuge aus Kapitel 8.2.1 im Bereich von 9,1 bis 12,3 m, siehe Abbildung 46.

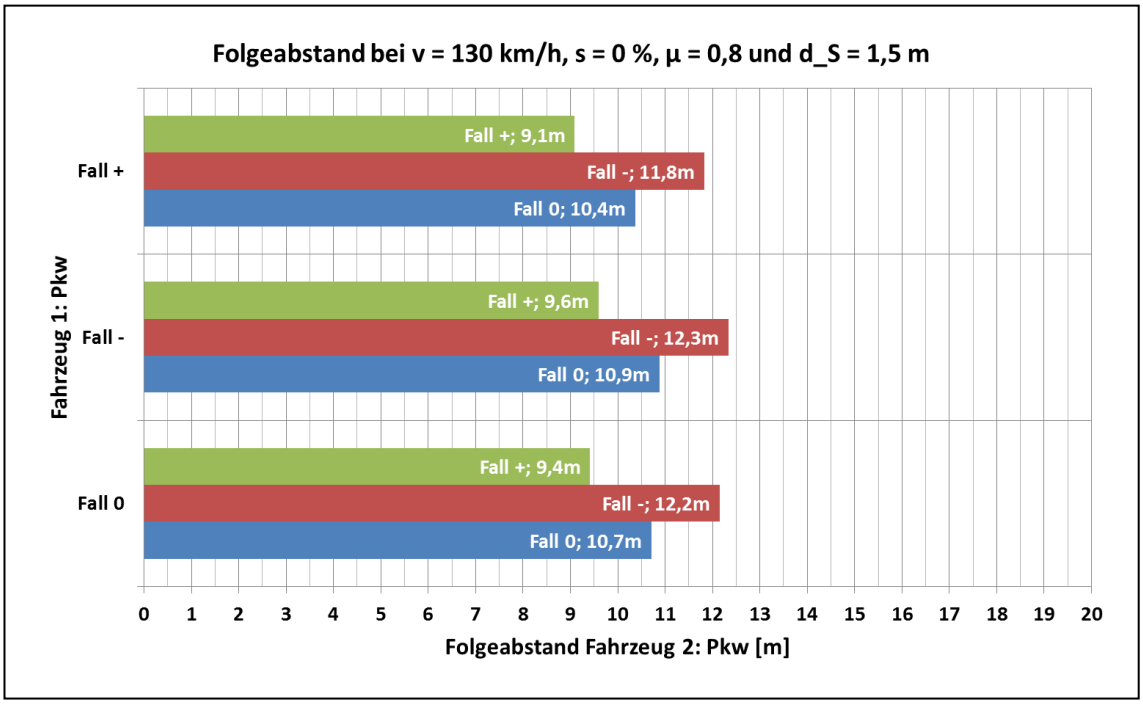

Folgeabstand bei v = 130 km/h, s = 0 %, μ = 0,8 und d_S = 1,5 m
Fahrzeug 1: Pkw
Fall +
Fall -
Fall 0
Fall +; 9,1m
Fall -; 11,8m
Fall 0; 10,4m
Fall +; 9,6m
Fall -; 12,3m
Fall 0; 10,9m
Fall +; 9,4m
Fall -; 12,2m
Fall 0; 10,7m
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
Folgeabstand Fahrzeug 2: Pkw [m]

Abbildung 46: Ermittelte Folgeabstände für eine Pkw-Kolonne.

Kolonnenlänge

Bei einem Folgeabstand von im Mittel ca. 11 m bei 130 km/h und einer mittleren Pkw-Länge von 5 m, könnten eine Pkw-Kolonne aus 11 Fahrzeugen bestehen – bei entsprechenden Fahrzeugkombinationen auch mehr.

Weitere Aspekte

Im Gegensatz zu Lkw- und Bus-Kolonnen sind Überholvorgänge bei Pkw-Kolonnen wahrscheinlicher. Hier sinkt zwar ebenfalls die Überholmöglichkeit mit steigender Fahrzeuganzahl, jedoch können Überholvorgänge aufgrund der höheren Beschleunigungsfähigkeit und der höheren Ausgangsgeschwindigkeit einfacher und zügiger erfolgen. Weitere Situationen, wie z.B. Fahrten in Steigungen, werden in Abschnitt 9.1.3 betrachtet.

8.2.5 Betrachtung inhomogener Kolonnen

Bei inhomogenen Kolonnen kommt es aus Sicherheitsgründen nicht in Frage, dass die Reihenfolge innerhalb einer Kolonne beliebig gewählt werden kann. Ein Pkw sollte in der Kolonne nicht vor oder zwischen Lkw angeordnet werden, da bei einem Unfall durch die Crash-inkompatiblen Massen das Risiko für den Pkw deutlich zu hoch wäre (z.B. höheres Verletzungsrisiko, Personenanzahl in den Fahrzeugen höher). Gleiches gilt für einen Reisebus vor oder zwischen Lkw. Hauptursache hierfür sind die großen Massenunterschiede zwischen Pkw, Bussen und Lkw.

Bei inhomogenen Kolonnen wird daher festgelegt, dass stets die Reihenfolge *Lkw vor Bus vor Pkw* eingehalten werden muss. Daraus ergibt sich, dass ein Pkw nie eine inhomogene Kolonne anführen kann und er stets hinter Lkw und Bussen angeordnet wird.

Wie in Abschnitt 8.2.4 erwähnt wurde, ist davon auszugehen, dass ein System zur autonomen Kolonnenfahrt zunächst im Lkw-Bereich Anwendung finden wird. Die Möglichkeit zur Kopplung von Pkw und Reisebussen an eine Lkw-geführte Kolonne erhöht die Wahrscheinlichkeit, eine Kolonne bilden zu können – vor allem in der Einführungsphase sowie auf weniger stark ausgelasteten Autobahnen. Da die Kolonnenteilnehmer unterschiedlich stark von der Kolonnenfahrt profitieren, wäre ein Vergütungssystem sinnvoll (vgl. SARTRE-Projekt, Kapitel 6.2.2).

Geschwindigkeitswahl und Folgeabstand

Die zulässige Geschwindigkeit für die Kolonne ist abhängig von den teilnehmenden Fahrzeugen und deren geltenden Geschwindigkeitsbeschränkungen. Wiederum abhängig von der Geschwindigkeit und den vorausfahrenden Fahrzeugen wird der Folgeabstand gewählt, siehe Anlage 2. Die Wahl der Geschwindigkeit und der Beschleunigungsbereiche sollten sich am „schwächsten“ Fahrzeug der Kolonne orientieren (analog zu homogenen Kolonnen). Dabei können die Daten über die C2C-Vernetzung an das Führungsfahrzeug bzw. den Kolonnenregler weitergegeben werden.

Kolonnenlänge

Die Anzahl der Teilnehmer ist abhängig von den Fahrzeugen und deren Folgeabstände. Angenommen wird z.B. eine Kolonne, bestehend aus zwei Lkw mit jeweils 18,35 m und einem mittleren Folgeabstand von 10 m, sowie einem folgenden Reisebus mit einer Fahrzeuglänge von 13 m und einem Folgeabstand zum zweiten Lkw von ca. 10,5 m. In diesem Fall könnten weitere sechs bis sieben Pkw mit einer mittleren Fahrzeuglänge von 5 m und einem mittleren Folgeabstand von ca. 7 m an der Kolonne teilnehmen.

Weitere Aspekte

Überholvorgänge sollten bei inhomogenen Kolonnen mit Lkw vermieden werden (analog zu den Lkw-Kolonnen). Bei inhomogenen Kolonnen, die aus Bussen und Pkw bestehen, wären Überholvorgänge von Lkw möglich – jedoch wie bei den bisherigen Ausführungen mit steigender Kolonnenlänge ohne eine Aufteilung der Kolonne ebenfalls unwahrscheinlich. Weitere Situationen, wie z.B. Fahrten in Steigungen, werden in Abschnitt 9.1.3 betrachtet.

8.2.6 Zusammenfassung zur Kolonnenzusammensetzung

Für die Kolonnenzusammensetzung kann zusammengefasst werden:

- *Kolonnenteilnehmer:* Es können sowohl homogene als auch nicht-homogene Kolonnen gebildet werden – bei nicht homogenen Kolonnen ist aus Sicherheitsgründen stets die Reihenfolge Lkw – Bus – Pkw einzuhalten.
- *Kolonnenlänge:* Erste Studien zeigen, dass eine maximale Kolonnenlänge von ca. 170 m noch akzeptabel ist. Die Akzeptanz der Kolonnen durch die nicht gekoppelten Verkehrsteilnehmer ist sicherlich von den Interaktionsmöglichkeiten mit der Kolonne abhängig (vgl. Kapitel 9) und muss noch weiter untersucht werden. Die maximale Anzahl an Folgefahrzeugen ist vom jeweiligen Folgeabstand und den jeweiligen Fahrzeuglängen abhängig.
- *Vergütungssystem:* Da die Teilnehmer unterschiedlich stark von der Kolonnenfahrt profitieren, erscheint ein Vergütungssystem sinnvoll.
- *Fahrdynamische Grenzen:* Die Geschwindigkeitswahl ist abhängig von den gültigen Gesetzgebungen, auf nicht beschränkten Autobahnen in Deutschland sind 130 km/h für Pkw-Kolonnen denkbar. Die Beschleunigungsgrenzen richten sich nach dem „schwächsten“ Kolonnenteilnehmer bzw. nach Komfortaspekten, wie sie bei ACC-Systemen bereits betrachtet werden.
- *Folgeabstand:* Der Folgeabstand kann für die Kolonnenteilnehmer individuell ermittelt und eingeregelt werden. Es wurden näherungsweise gültige Mindestabstände inklusive Sicherheitspuffer ermittelt. Das energetische Optimum wird in Kapitel 10.2 betrachtet.

9 Handlungsstrategien bei der autonomen Kolonnenfahrt

Für die Umsetzung der autonomen Kolonnenfahrt müssen wie auch beim teil-, hoch- oder vollautomatisierten Fahren Handlungsstrategien erarbeitet werden (vgl. Pudenz, 2011b). Diese Handlungsstrategien werden vom Fahrzeug in Abhängigkeit der ermittelten Verkehrssituation ausgeführt. In Bezug auf die autonome Kolonnenfahrt müssen hierzu verschiedenste Szenarien betrachtet werden. Die Überlegungen sind dabei nicht an die Vorgaben der Projekte KONVOI oder SARTRE gebunden, die sich auf Lastkraftwagen als Führungsfahrzeuge und auf Höchstgeschwindigkeiten von 90 km/h beschränken.

Im Rahmen dieses Kapitels soll im Abschnitt 9.1 auf grundlegende Handlungsstrategien eingegangen werden, die u.a. die Bildung einer Fahrzeugkolonne, den Beitritt zu einer Fahrzeugkolonne oder das Verlassen einer Fahrzeugkolonne regeln. Zudem werden Überlegungen ausgeführt, wie sich eine Kolonne im Bereich von Steigungsstrecken, bei wechselnden Verkehrszuständen oder beim Auftritt eines Systemfehlers verhalten kann. Die Interaktion der Fahrzeugkolonne mit anderen Verkehrsteilnehmern wird im Abschnitt 9.2 behandelt.

Die Teilnahme an einer Fahrzeugkolonne setzt eine gewisse technische Ausstattung, welche in Kapitel 8.1 beschrieben ist, voraus. Für die folgenden Ausführungen wird angenommen, dass potentielle Kolonnenteilnehmer über diese Ausstattung in vollem Umfang verfügen. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass die Fahrzeuge an der C2XC teilnehmen und über ein Ortungssystem ihre Position bestimmen können. Dass die Fahrzeugkommunikation bereits eine gewisse Marktverbreitung erfahren hat, ehe die autonome Kolonnenfahrt Serienreife erlangt, wird durch einen Blick auf die aktuellen Entwicklungsstände bei der Car-to-X-Communication und der autonomen Kolonnenfahrt unterstützt. Für die C2XC wurde 2012 ein einheitlicher herstellerübergreifender Übertragungsstandard beschlossen, auf dessen Basis nun weitere Entwicklungen stattfinden, siehe Kapitel 5.5.1. Die Umsetzbarkeit einer autonomen Kolonnenfahrt wurde zwar in verschiedenen Projekten gezeigt (Kapitel 6.2), jedoch gibt es auf diesem Gebiet bisher keine herstellerübergreifenden Standards.

Das Fahrzeugkollektiv für die weiteren Ausführungen setzt sich somit folgendermaßen zusammen. Die Auflistung zur Unterscheidung der Verkehrsteilnehmer gilt sowohl für Pkw und Lkw als auch für Reisebusse.

- *Potentielle Kolonnenteilnehmer mit Kommunikationsmöglichkeit:* Fahrzeuge, die C2XC-fähig sind und über die technischen Voraussetzungen zur Teilnahme an einer Fahrzeugkolonne verfügen.
- *Verkehrsteilnehmer mit Kommunikationsmöglichkeit:* Fahrzeuge, die C2XC-fähig sind, jedoch nicht über die technischen Voraussetzungen zur Teilnahme an einer Fahrzeugkolonne verfügen.

- *Verkehrsteilnehmer ohne Kommunikationsmöglichkeit:* Fahrzeuge die weder C2XC-fähig sind, noch über die technischen Voraussetzungen zur Teilnahme an einer Fahrzeugkolonne verfügen. Diese Fahrzeuge entsprechen dem heutigen Serienstand (2013).

Bei den verschiedenen Szenarien, die nachfolgend betrachtet werden, wird zudem jeweils zwischen Handlungen des Führungsfahrzeugs und zwischen Handlungen der Folgefahrzeuge unterschieden. Ferner fließen die verschiedenen Möglichkeiten der Kolonnenzusammensetzung in die Überlegungen mit ein.

9.1 Interaktion innerhalb der Fahrzeugkolonne

9.1.1 Bilden einer Kolonne

Um eine Kolonne bilden zu können, sind ein Führungsfahrzeug und mindestens ein Folgefahrzeug notwendig. In diesem Kapitel soll zunächst die Situation betrachtet werden, in der ein potentielles Führungsfahrzeug seine Bereitschaft zur Kolonnenbildung anmeldet und sich daraufhin das erste Folgefahrzeug anschließt.

Der Ausgangszustand ist eine gewöhnliche Verkehrssituation auf einer Autobahn oder autobahnähnlichen Straße bei der alle Fahrzeuge im nicht gekoppelten Zustand sind. Der Fahrer eines potentiellen Führungsfahrzeugs kann über das HMI die Bereitschaft zur Kolonnenbildung signalisieren und seine Wunschgeschwindigkeit einstellen. Diese Geschwindigkeit muss im Rahmen der für Kolonnen gesetzten Geschwindigkeitsbeschränkungen liegen (siehe Kapitel 8.2) und darf die aktuelle Geschwindigkeitsbegrenzung nicht überschreiten. Die Fahrerassistenzsysteme zur Längs- und Querführung unterstützen den Fahrer des potentiellen Führungsfahrzeugs nach der Anmeldung seiner Führungsbereitschaft spätestens von nun an bei der Einhaltung der Geschwindigkeit und bei der Spurführung.

Die Bereitschaft zur Kolonnenführung kann mittels C2CC via WLAN an andere potentielle Kolonnenteilnehmer mit derselben Fahrtrichtung in einem gewissen Umkreis mitgeteilt werden. Dabei sollte die Nachricht entsprechend codiert sein, dass nur potentielle Kolonnenteilnehmer angesprochen werden. Zudem muss eine Information zur beabsichtigten Fahrgeschwindigkeit und zur aktuellen Position des Führungsfahrzeugs übermittelt werden. Optional und hilfreich kann zudem die Angabe aus der Routenplanung sein, für wie viele Kilometer das Führungsfahrzeug voraussichtlich auf der aktuellen Straße bleibt und inwiefern sich die Fahrzeit bei Kolonnenteilnahme von der Fahrzeit bei freier Fahrt im nicht gebundenen Verkehr unterscheidet. Dies kann besonders dann relevant sein, wenn sich ein Reisebus oder ein Pkw bei freiem Verkehrsfluss einem Lkw-Führungsfahrzeug anschließen möchte und folglich nur noch eine geringere

Reisegeschwindigkeit erreicht. Sofern die Kolonnenfahrt an ein Bezahlsystem gebunden ist, ist es darüber hinaus vorstellbar, potentielle Kolonnenteilnehmer über die voraussichtlichen Kosten, aber auch über die möglichen Spriteinsparungen zu informieren.

Ist ein Führungsfahrzeug bereits mit einer Geschwindigkeit unterwegs, die der aktuell geltenden Geschwindigkeitsbegrenzung entspricht, soll die Nachricht nur an Fahrzeuge versendet werden, die sich vor diesem Fahrzeug befinden. Sie müssen sich bei Interesse an der Teilnahme zur Fahrzeugkolonne zurückfallen lassen. Fahrzeuge hinter dem Führungsfahrzeug müssten dagegen die Geschwindigkeitsbegrenzung überschreiten, um das Führungsfahrzeug erreichen zu können. Dies soll durch einen entsprechend eingeschränkten Empfängerkreis vermieden werden. Soll jedoch auch potentiellen Folgefahrzeugen hinter dem Führungsfahrzeug die Kolonnenteilnahme ermöglicht werden, ist ein kooperatives System notwendig, bei dem das Führungsfahrzeug die Geschwindigkeit kurzzeitig reduziert, um diese Fahrzeuge aufschließen zu lassen. Wie die Meldung eines potentiellen Führungsfahrzeugs bei einem Empfänger aussehen kann, zeigt Abbildung 47.

Abbildung 47: Meldung in einem potentiellen Folgefahrzeug über das Angebot zum Anschluss an ein Führungsfahrzeug. (In Anlehnung an BMW, 2013b)

Zur Verdeutlichung der vorangehenden Beschreibung und den getroffenen Einschränkungen sollen an dieser Stelle verschiedene Musterfälle betrachtet werden:

- *Pkw meldet sich als Führungsfahrzeug an:* Der Fahrer übermittelt zudem seine Wunschgeschwindigkeit. Empfänger der Nachricht sind andere C2XC-fähige Pkw, die über die technischen Voraussetzungen zur Teilnahme an einer Fahrzeugkolonne verfügen und das Führungsfahrzeug ohne Überschreiten der geltenden Geschwindigkeitsbegrenzung erreichen können. Da Busse und Lkw als Folgefahrzeuge hinter einem Pkw ausgeschlossen sind, erhalten diese keine Nachricht, auch wenn die Wunschgeschwindigkeit des Pkw im zulässigen Geschwindigkeitsbereich von Bussen und Lkw liegt.

- *Bus meldet sich als Führungsfahrzeug:* Der Fahrer übermittelt zudem seine Wunschgeschwindigkeit, die sich in der Regel an der zulässigen Höchstgeschwindigkeit für Busse orientieren wird. Empfänger der Nachricht sind andere C2XC-fähige Pkw und Busse, die über die technischen Voraussetzungen zur Teilnahme an einer Fahrzeugkolonne verfügen und das Führungsfahrzeug ohne Überschreiten der geltenden Geschwindigkeitsbegrenzung erreichen können. Da Lkw als Folgefahrzeuge hinter einem Bus ausgeschlossen sind, erhalten diese keine Nachricht, auch wenn die Wunschgeschwindigkeit des Busses im zulässigen Geschwindigkeitsbereich des Lkw liegt.
- *Lkw meldet sich als Führungsfahrzeug:* Der Fahrer übermittelt zudem seine Wunschgeschwindigkeit, die sich in der Regel an der zulässigen Höchstgeschwindigkeit für Lkw orientieren wird. Empfänger der Nachricht sind andere C2XC-fähige Lkw, Pkw und Busse, die über die technischen Voraussetzungen zur Teilnahme an einer Fahrzeugkolonne verfügen und das Führungsfahrzeug ohne Überschreiten der geltenden Geschwindigkeitsbegrenzung erreichen können. Da sich sowohl Lkw, Pkw als auch Busse als Folgefahrzeuge hinter einem Lkw eignen, erfolgt keine weitere Einschränkung des Empfängerkreises.

Nachdem eine Meldung bei einem potentiellen Kolonnenteilnehmer eingegangen ist, kann dieser dem System mitteilen, ob er sich dem Führungsfahrzeug anschließen möchte oder nicht, siehe Abbildung 47. Diese Entscheidung wird vermutlich in Abhängigkeit der vorgeschlagen Geschwindigkeit, aber auch in Abhängigkeit aktueller Bedürfnisse nach Entspannung oder Alternativtätigkeiten getroffen werden. Entscheidet er sich für einen Beitritt, ist ein Platz in der Kolonne für ihn reserviert und das System kann weitere Informationen beispielweise zu Fahrzeugtyp und Farbe sowie zur genauen Entfernung zum Führungsfahrzeug geben. Dies unterstützt den Fahrer beim Auffinden des Führungsfahrzeugs. Eine Möglichkeit zur Aufbereitung dieser Informationen zeigt Abbildung 48.

Abbildung 48: Anzeigefeld zur Unterstützung eines potentiellen Folgefahrzeugs beim Auffinden des Führungsfahrzeugs. (In Anlehnung an BMW, 2013b)

Das System fordert den Fahrer des Folgefahrzeugs auf, sich hinter dem Führungsfahrzeug zu platzieren. Da zu diesem Zeitpunkt das Fahrzeug von einem Fahrer gesteuert wird, muss er dabei den gesetzlich vorgeschriebenen Mindestabstand einhalten. Um Verwechslungen beim Auffinden des Führungsfahrzeugs zu vermeiden und um Sicherzustellen, dass sich das Folgefahrzeug hinter dem richtigen Fahrzeug befindet, können weitere Daten zur Fahrgeschwindigkeit oder zur aktuellen Position abgeglichen werden. Sobald sich das Folgefahrzeug hinter dem Führungsfahrzeug befindet und die Fahrzeugsensorik dies erkennt (z.B. durch eine Datenfusion aus Positionsbestimmung und Umfeldsensorik), kann eine Abfrage erfolgen, ob man die Steuerung des Fahrzeugs an das System übergeben möchte. Bei Bestätigung dieser Abfrage übernimmt das Fahrzeug die vollständige Längs- und Querführung. Anschließend wird der Abstand zum Führungsfahrzeug verringert und auf einen vom Kolonnenregler im Führungsfahrzeug vorgegebenen Wert (siehe auch Kapitel 8.2) eingeregelt („elektronische Deichsel“). Die Kolonne besteht nun aus einem Führungsfahrzeug und einem Folgefahrzeug, womit die Kolonnenbildung abgeschlossen ist.

Neben dem oben beschriebenen Vorgehen zur Signalisierung der Bereitschaft, eine Fahrzeugkolonne zu führen, besteht auch die Möglichkeit eine Kolonnenfahrt vorab auf einer Internetplattform zu publizieren (vgl. SARTRE, Kapitel 6.2.2). Dieses Vorgehen bietet sich beispielsweise für Speditionen an, die regelmäßig und zu bestimmten Zeiten eine gewisse Strecke befahren. Mit Angaben zu Abfahrtsort, Abfahrtszeit und Reiseziel können sich potentielle Nutzer ebenfalls über das Internet oder via Smartphone über Kolonnenangebote informieren und einen Platz reservieren. Bei diesem Vorgehen kommt es jedoch sehr darauf an, zur richtigen Zeit am richtigen Ort zu sein. Fährt ein potentieller Kolonnenteilnehmer beispielsweise zehn Minuten nach einer Kolonne, der er sich anschließen wollte, auf die Autobahn auf, so hat er bereits 13 bis 20 Kilometer Rückstand (Lkw-Führungsfahrzeug mit 80 km/h beziehungsweise Pkw-Führungsfahrzeug mit 120 km/h). Im umgekehrten Fall, dass sich beispielweise ein Lkw-Führungsfahrzeug um 10 Minuten verspätet, wird die Kolonnennutzung beinahe unmöglich. Der potentielle Kolonnenteilnehmer müsste seine Geschwindigkeit auf der Autobahn drastisch reduzieren, um den Lkw aufschließen und überholen zu lassen. Dies ist jedoch kritisch, da Kraftfahrzeuge ohne Grund nicht so langsam fahren dürfen, dass sie den Verkehrsfluss behindern (vgl. StVO, 2013). Alternativ müsste die Fahrzeugkolonne an einem Park- oder Rastplatz abgewartet werden. Befindet sich die Fahrzeugkolonne jedoch in einer erreichbaren Entfernung, erhält das potentielle Folgefahrzeug Informationen bezüglich der aktuellen Position des Führungsfahrzeugs, um sich diesem anschließen zu können. Das weitere Vorgehen entspricht dem aus den vorangegangenen Absätzen.

Das in diesem Kapitel aufgezeigte Szenario baut darauf auf, dass sich ein potentielles Führungsfahrzeug anbietet und potentielle Folgefahrzeuge darüber informiert. Es ist jedoch auch vorstellbar, dass Fahrer potentieller Folgefahrzeuge signalisieren, dass sie auf der Suche nach einer Fahrzeugkolonne beziehungsweise einem Führungsfahrzeug sind. Sofern gewünscht, kann dies auch vom Fahrzeug automatisch übernommen wer-

den um die Nutzungshäufigkeit des Systems zu forcieren. Im Cockpit eines potentiellen Führungsfahrzeugs kann dann angezeigt werden, wie viele potentielle Folgefahrzeuge sich in seinem Umfeld befinden. Daraufhin kann der Fahrer entscheiden, ob er die Rolle eines Führungsfahrzeugs übernehmen möchte und potentielle Folgefahrzeuge darüber informiert. Der weitere Handlungsablauf orientiert sich anschließend am oben beschriebenen Vorgehen.

9.1.2 Beitritt zu einer Kolonne

In diesem Kapitel sollen verschiedene Szenarien betrachtet werden, bei denen potentielle Folgefahrzeuge einer bestehenden Fahrzeugkolonne beitreten. Während in Kapitel 9.1.1 die elektronische Kopplung eines ersten Folgefahrzeugs hinter dem Führungsfahrzeug betrachtet wird, gibt es beim Beitritt zu einer bestehenden Kolonne in Abhängigkeit ihrer Zusammensetzung mehrere Möglichkeiten, ein Fahrzeug darin zu platzieren. Die Informationsverbreitung an potentielle Folgefahrzeuge zur möglichen Teilnahme an einer bestehenden Fahrzeugkolonne orientiert sich dabei am in Kapitel 9.1.1 beschrieben Vorgehen und wird hier nicht wieder aufgegriffen. Ebenfalls kann die Unterstützung zum Auffinden einer Fahrzeugkolonne in ähnlicher Weise erfolgen. Unterschiede ergeben sich hauptsächlich dann, wenn sich beitretende Kolonnenteilnehmer zwischen anderen Kolonnenteilnehmern einordnen müssen. Generell besteht für einen neuen Kolonnenteilnehmer die Möglichkeit, sich am Ende einer Fahrzeugkolonne, an der Spitze einer Fahrzeugkolonne oder an einer Position zwischen anderen Fahrzeugen einzuordnen. Ein Kolonnenbeitritt ist für alle potentiellen Kolonnenteilnehmer jedoch ausgeschlossen, sofern die maximale Teilnehmerzahl, die von der Kolonnengesamtlänge abhängt (siehe Kapitel 8.2), bereits erreicht ist. In diesem Fall werden potentielle Folgefahrzeuge jedoch auch nicht auf die Kolonne hingewiesen. Für eine bessere Übersicht und deutlichere Abgrenzung verschiedener Musterfälle werden die denkbaren Handlungsstrategien in Bezug auf den Kolonnenbeitritt in Unterkapiteln skizziert. In Kapitel 9.1.2.1 werden verschiedene Varianten für einen Kolonnenbeitritt genauer betrachtet, die sich auf die anderen Kapitel übertragen lassen. Daher sollen in diesen Abschnitten lediglich spezifische Besonderheiten erläutert werden.

9.1.2.1 Beitritt in eine Kolonne mit Pkw-Führungsfahrzeug

Eine Kolonne mit einem Pkw als Führungsfahrzeug schließt Busse und Lkw von der Kolonnenteilnahme aus. Im Fall einer reinen Pkw-Kolonne lassen sich für den Kolonnenbeitritt drei Varianten betrachten:

- *Variante 1:* Ein potentieller Kolonnenteilnehmer befindet sich hinter der Fahrzeugkolonne und ordnet sich hinter dem letzten Folgefahrzeug ein.

- *Variante 2:* Ein potentieller neuer Kolonnenteilnehmer befindet sich vor der Fahrzeugkolonne und ordnet sich beim Kolonnenbeitritt hinter dem Führungsfahrzeug ein.
- *Variante 3:* Ein potentieller neuer Kolonnenteilnehmer befindet sich vor der Fahrzeugkolonne, lässt diese aufschließen und übernimmt die Führungsaufgabe.

Variante 1 entspricht weitestgehend dem Szenario aus Kapitel 9.1.1 mit dem Unterschied, dass sich der neue Kolonnenteilnehmer hinter dem letzten Folgefahrzeug und nicht hinter dem Führungsfahrzeug positionieren muss, um die Steuerung des Fahrzeugs an den Autopiloten zu übergeben. In analoger Art und Weise bekommt er auch Informationen zur Position der Kolonne sowie zu Fahrzeugtyp und Fahrzeugfarbe des hinteren Folgefahrzeugs.

Bei *Variante 2* befindet sich der neue Kolonnenteilnehmer zunächst vor der Fahrzeugkolonne. Um sich ihr anzuschließen, könnte er sich von der gesamten Kolonne überholen lassen und sich hinter dem letzten Folgefahrzeug platzieren. Um jedoch einen Überholvorgang der gesamten Kolonne zu vermeiden, bieten sich zwei Handlungsstrategien an.

Die erste Strategie sieht dabei vor, dass der neue Kolonnenteilnehmer lediglich vom Führungsfahrzeug überholt wird. Anhand der nachfolgenden Abbildungen soll dieser Ablauf genauer erläutert werden. Abbildung 49 (oben) zeigt hierzu einen neuen Kolonnenteilnehmer (oranges Fahrzeug), der sich bereits für den Beitritt zu der hinter ihm befindlichen Fahrzeugkolonne (grüne Fahrzeuge) entschieden hat. Sobald die Fahrzeugkolonne den gesetzlichen Mindestabstand zum neuen Kolonnenteilnehmer erreicht hat, wird der Fahrer des orangen Fahrzeugs aufgefordert, die Fahrzeugsteuerung an das System zu übergeben. Das Spurhaltesystem und die adaptive Geschwindigkeitsregelung sind nun aktiv. Gleichzeitig ist das Fahrzeug via C2CC mit den anderen Fahrzeugen der Kolonne verbunden. Dies ermöglicht es, die weiteren Schritte bis zur vollständigen Integration des Fahrzeugs, hochautomatisiert durchzuführen. Der Fahrer des orangen Fahrzeugs bleibt dabei in der Verantwortung und muss die Systeme überwachen. Durch die C2CC können Informationen zur Geschwindigkeit der Kolonne mit dem neuen Kolonnenteilnehmer ausgetauscht werden, sodass dieser stets etwas langsamer fährt und die Kolonne aufschließen lässt.

Sofern der linke Fahrstreifen frei ist, wechselt das Führungsfahrzeug anschließend hochautomatisiert oder – je nach System – durch Eingreifen des Fahrers nach links, um den neuen Kolonnenteilnehmer zu überholen, siehe Abbildung 49 (Mitte). Durch die Kommunikationsmöglichkeit ist innerhalb der Kolonne bekannt, dass ein Fahrzeugbeitritt von vorne stattfindet, wodurch sich die Folgefahrzeuge auf diese Situation einstellen können. Speziell das erste Folgefahrzeug muss darüber informiert sein, dass es in diesem Modus nicht dem Führungsfahrzeug folgen darf, sondern den Fahrstreifen beibehält und das ACC auf das neue orange Fahrzeug ausrichtet. Die bisherigen Folge-

fahrzeuge verbleiben jedoch während des gesamten Vorgangs in ihrem hoch- bzw. vollautomatisierten Fahrmodus.

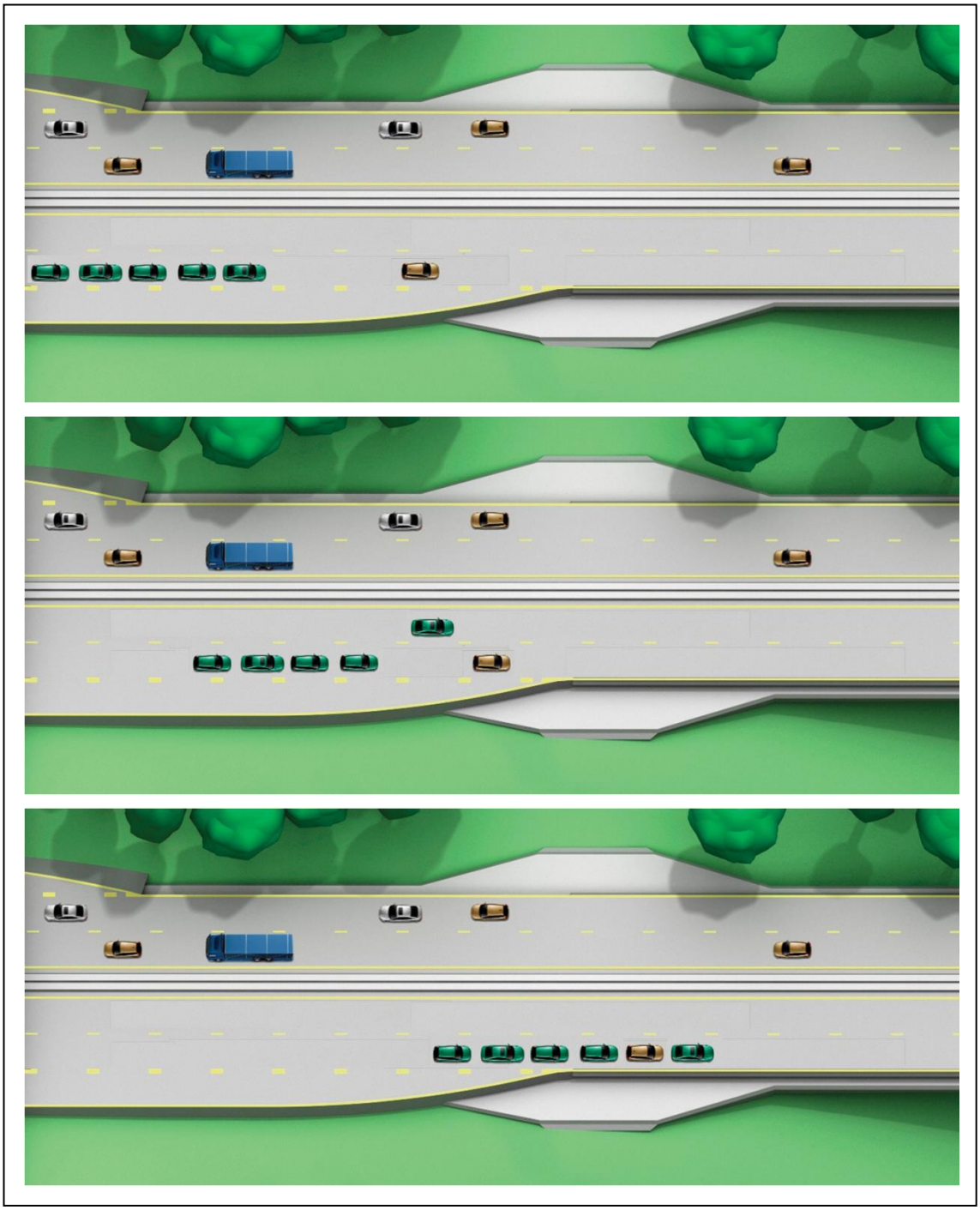


Abbildung 49: Integration eines neuen Kolonnenteilnehmers von vorne. (In Anlehnung an Ricardo, 2009)

Nachdem der Überholvorgang des Führungsfahrzeugs beendet ist, wird der Fahrer des orangen Fahrzeugs darüber informiert, dass er die endgültige Position innerhalb der Kolonne erreicht hat. Anschließend werden die Geschwindigkeiten zwischen dem Führungsfahrzeug und den Folgefahrzeugen angeglichen und die Abstände zwischen den

Fahrzeugen auf einen vom Kolonnenregler vorgegebenen Wert eingeregelt, siehe Abbildung 49 (unten). Der Beitritt des Pkw zur Kolonne ist hiermit abgeschlossen.

Die zweite Handlungsstrategie für die Integration eines neuen Kolonnenteilnehmers, der sich vor der Kolonne befindet, basiert darauf, dass er sich neben der Fahrzeugkolonne platziert und die Folgefahrzeuge eine ausreichend große Lücke bilden, siehe Abbildung 50.

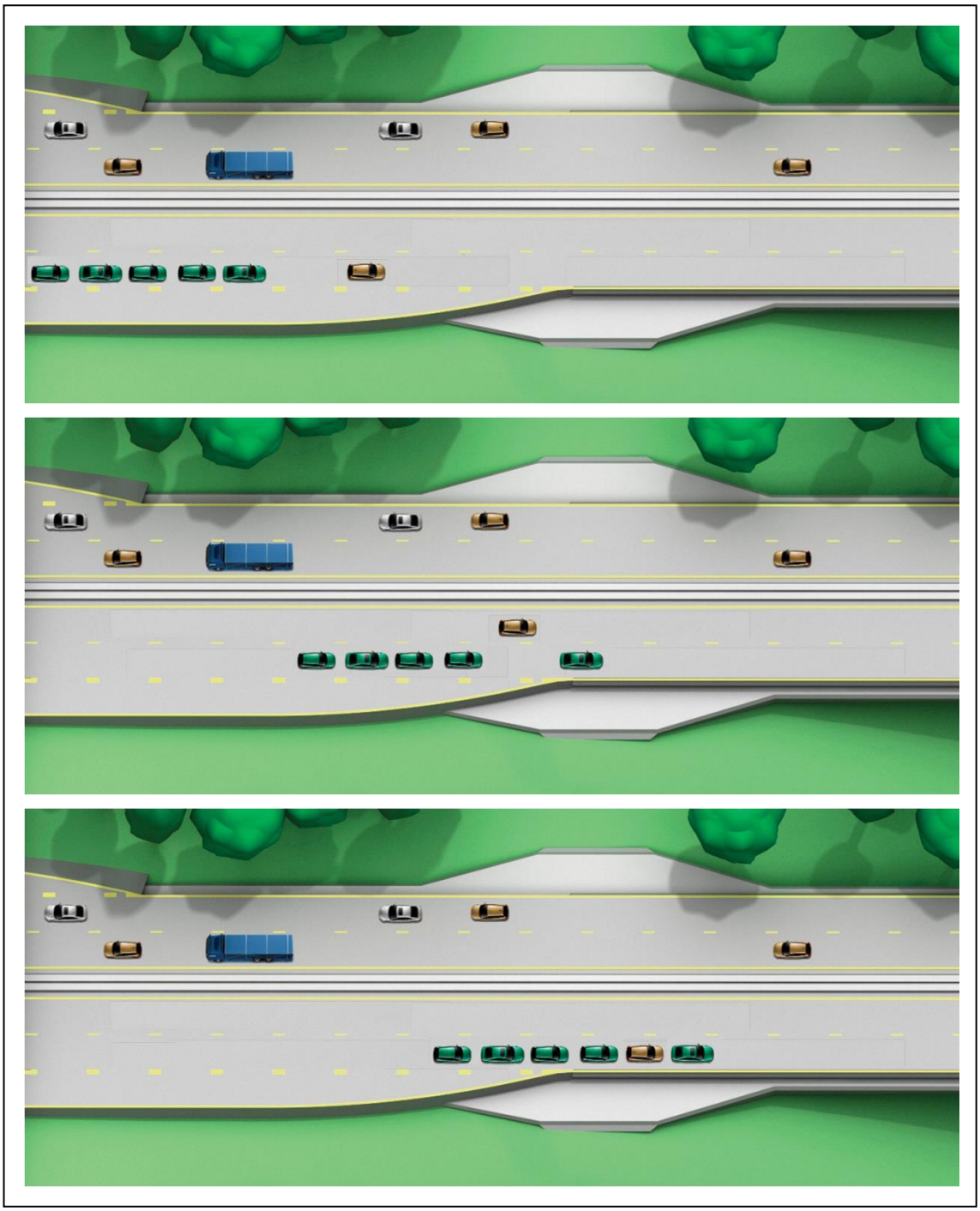


Abbildung 50: Seitliche Integration eines neuen Kolonnenteilnehmers von vorne. (In Anlehnung an Ricardo, 2009)

Hierzu kann der Fahrer des orangen Fahrzeugs auf den linken Fahrstreifen wechseln und sich dort zurückfallen lassen. Um diesen Fahrstreifen möglichst schnell wieder freigeben zu können, wird der Abstand zwischen dem Führungsfahrzeug und dem ersten Folgefahrzeug vergrößert, so dass dort der neue Kolonnenteilnehmer platziert werden kann.

Im Vergleich zur ersten Handlungsstrategie (Abbildung 49) für die Integration eines neuen Kolonnenteilnehmers weist die zweite Strategie jedoch einige Nachteile auf. So muss das orange Fahrzeug mit verringerter Geschwindigkeit auf den linken Fahrstreifen wechseln und blockiert dort gegebenenfalls andere Verkehrsteilnehmer solange, bis die Integration abgeschlossen ist. Der Überholvorgang bei der ersten Handlungsstrategie kann schneller durchgeführt werden, da das Führungsfahrzeug weiterhin mit seiner festgelegten Kolonnengeschwindigkeit unterwegs ist Zudem ist das Führungsfahrzeug bei dieser zweiten vorgestellten Variante dazu gezwungen, das Rechtsüberholverbot zu missachten. Aufgrund der angesprochenen Nachteile wird diese zweite Handlungsstrategie aus Abbildung 50 nicht tiefergehend erläutert.

Eingangs des Kapitels wurde als *Variante 3* für die Integration eines Pkw in eine reine Pkw-Kolonne der Fall genannt, dass sich ein potentieller neuer Kolonnenteilnehmer vor der Fahrzeugkolonne befindet, diese aufschließen lässt und schließlich deren Führung übernimmt. Dabei ist es denkbar, dass der neue Kolonnenteilnehmer im Vorfeld gefragt wird, ob er als Folge- oder als Führungsfahrzeug teilnehmen möchte. Entscheidet er sich, die Kolonnenführung zu übernehmen, ist dies dem bisherigen Führungsfahrzeug mitzuteilen, da sich dieses und die dahinter folgende Kolonne nun dem neuen Führungsfahrzeug anschließen. Voraussetzung ist, dass sich die Fahrgeschwindigkeit, der alle anderen Kolonnenteilnehmer vorab zugestimmt hatten, nicht wesentlich ändert. Daten und Informationen aus dem Kolonnenregler des bisherigen Führungsfahrzeugs können via C2CC an das neue Führungsfahrzeug übermittelt werden. Inwiefern diese beschriebene Variante in der Praxis Anwendung finden kann, hängt u.a. davon ab, ob Führungsfahrzeuge vollautomatisiert fahren oder von einem Fahrer gesteuert beziehungsweise überwacht werden, der gegebenenfalls für die Führung der Kolonne entlohnt wird.

Die Ausführungen in diesem Kapitel zeigen, dass es praktikable Lösungsmöglichkeiten für die Integration neuer Kolonnenteilnehmer in eine bestehende Pkw-Kolonne gibt. Befindet sich der neue Kolonnenteilnehmer hinter der Kolonne und holt diese ein, so positioniert er sich hinter dem letzten Folgefahrzeug. Ein neuer Kolonnenteilnehmer, der sich vor der Kolonne befindet, lässt sich dagegen vom Führungsfahrzeug überholen und ordnet sich somit zwischen dem Führungsfahrzeug und dem dahinterliegenden Folgefahrzeug ein, siehe Abbildung 49.

© VuV 2013

9.1.2.2 Beitritt in eine Kolonne mit Lkw-Führungsfahrzeug

Eine Fahrzeugkolonne mit einem Lastkraftwagen als Führungsfahrzeug erlaubt die Aufnahme von Pkw, Lkw und Reisebussen als neue Kolonnenteilnehmer.

Zunächst sollen die Möglichkeiten des Kolonnenbeitritts für einen Pkw betrachtet werden. Hierbei muss zwischen zwei grundsätzlichen Varianten unterschieden werden. Nähert sich der neue Kolonnenteilnehmer von hinten, so positioniert er sich hinter dem letzten Folgefahrzeug der Kolonne. Wird der neue Kolonnenteilnehmer jedoch von der Kolonne eingeholt, so muss er vom Führungsfahrzeug (Lkw) zunächst überholt werden um der Kolonne vollständig beizutreten, analog Abbildung 49 auf Seite 137.

Eine Besonderheit ergibt sich, wenn dem Führungsfahrzeug mindestens ein weiterer Lkw oder Reisebus folgen, siehe Abbildung 51. Da sich ein Pkw in einer Fahrzeugkolonne nicht vor einem Lkw oder einem Bus befinden darf, müssen alle Lkw und Busse der Fahrzeugkolonne den Pkw überholen. Abbildung 51 zeigt dies für ein Beispiel mit zwei Lastkraftwagen. Der Kolonnenregler muss dabei klar definieren, welche Fahrzeuge dem Führungsfahrzeug auf den linken Fahrstreifen folgen. Inwiefern dieses Fahrmanöver hochautomatisiert durchgeführt werden kann, ist von den Systemeigenschaften der Assistenzsysteme und der Umfeldsensorik in den Fahrzeugen abhängig. Eine genauere Betrachtung zum Verhalten der Kolonnenteilnehmer beim Überholen anderer Fahrzeuge erfolgt in Kapitel 9.2.1.

Bei dem in Abbildung 51 gezeigten Vorgehen für die Integration eines Pkw in eine Lkw-geführte Kolonne stellt sich allerdings die Frage, ob diese Strategie der Integration für die Praxisanwendung sinnvoll ist. Gemäß StVo (2013) gilt in Deutschland für Lastkraftwagen mit einem zulässigen Gesamtgewicht über 3,5 Tonnen eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h. Der zu integrierende neue Kolonnenteilnehmer müsste diese Geschwindigkeit für einen schnellen Kolonnenbeitritt deutlich unterschreiten und aufpassen, dass er dabei andere Verkehrsteilnehmer nicht behindert. Selbige Überlegung gilt auch, wenn sich Reisebusse oder andere Lkw von vorne in die Kolonne integrieren lassen möchten. Diese Strategie kann jedoch Anwendung finden, wenn die maximal zulässige Geschwindigkeit ohnehin auf 80 km/h reduziert ist und somit keine großen Geschwindigkeitsdifferenzen zu anderen Verkehrsteilnehmern bestehen. Dies ist auf deutschen Autobahnen ein seltener Fall, kann jedoch auf autobahnähnlichen Bundesstraßen, besonders im Bereich von Ballungsräumen, häufig vorkommen. Inwiefern ein Fahrer eines Pkw oder auch eines Reisebusses bereit ist, diese Art der Integration zu nutzen, ist sicher auch von der Verbreitung des Systems abhängig. Sofern eine ausreichend große Anzahl an Lkw über die Möglichkeiten zur elektronischen Kopplung von Fahrzeugen verfügt und die Wahrscheinlichkeit somit groß ist, andere Kolonnen oder potentielle Führungsfahrzeuge anzutreffen, bietet sich der Anschluss an eine andere Kolonne an.

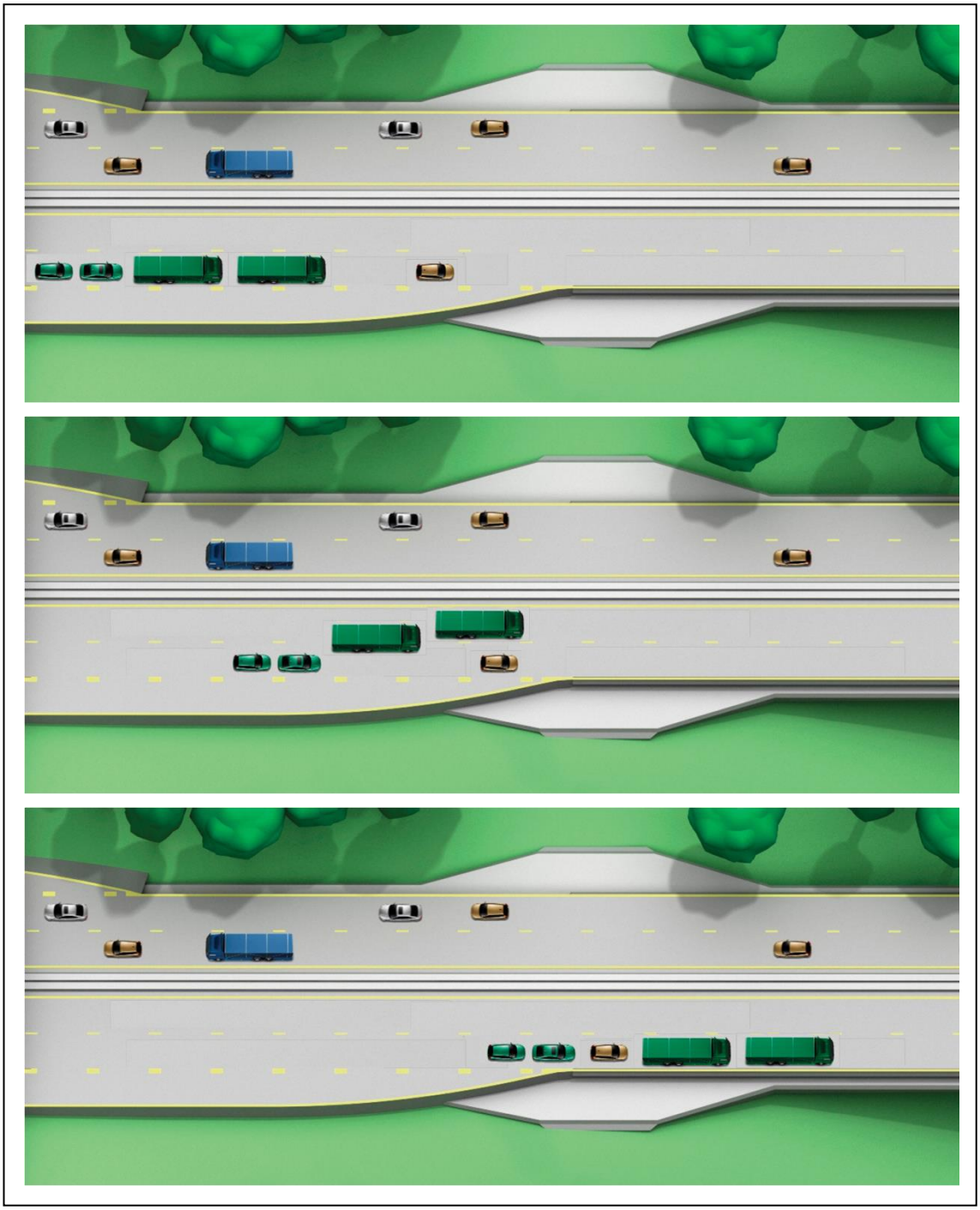


Abbildung 51: Integration eines neuen Kolonnenteilnehmers von vorne bei einem weiteren Lkw hinter dem Führungsfahrzeug. (In Anlehnung an Ricardo, 2009)

Für den Beitritt eines Lkw zu einer Lkw-geführten Kolonne bestehen ebenfalls die Möglichkeiten, diesen von vorne oder von hinten zu integrieren. Befindet sich der Lkw vor der Kolonne, zu der er beitreten möchte, so muss er vom Führungsfahrzeug, analog zu Abbildung 49 auf Seite 137 überholt werden. Schließt er von hinten auf eine Kolonne auf, sind verschiedene Handlungsstrategien je nach Kolonnenzusammensetzung zu

unterscheiden. Handelt es sich bei der Kolonne um eine reine Lkw-Kolonne, kann sich der neue Kolonnenteilnehmer direkt hinter dem letzten Folgefahrzeug positionieren. Befinden sich jedoch auch Reisebusse oder Pkw in der Kolonne, so müssen diese zunächst überholt werden, ehe sich der neue Kolonnenteilnehmer hinter dem letzten Lkw in einer Lücke positioniert. In Abbildung 52 wird dieses Vorgehen dargestellt.

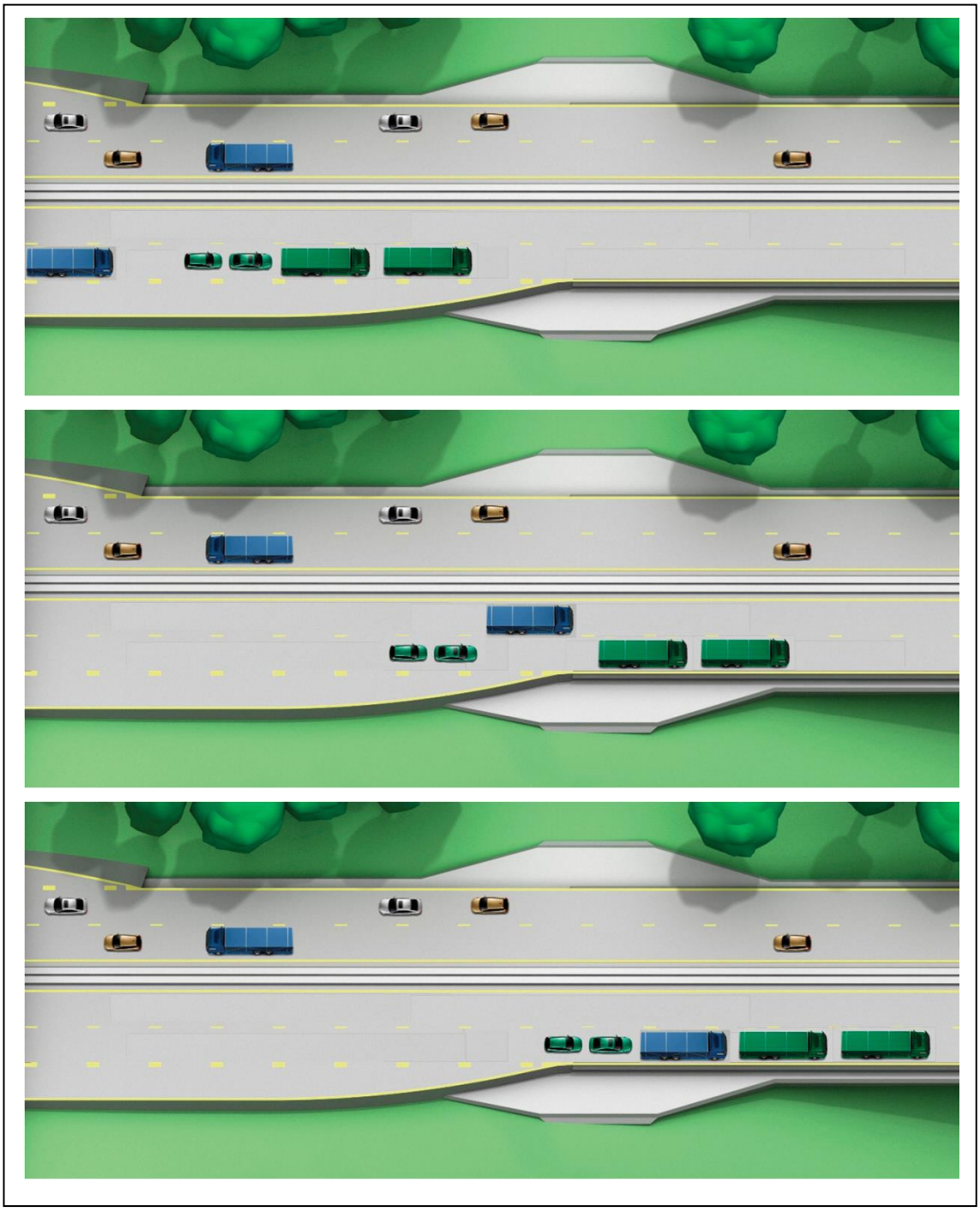


Abbildung 52: Integration eines Lkw in eine gemischte Fahrzeugkolonne. (In Anlehnung an Ricardo, 2009)

Der blaue Lkw stellt dabei den neuen Kolonnenteilnehmer dar, der sich in die grüne Fahrzeugkolonne integrieren möchte. Durch die Möglichkeit der Fahrzeugkommunikation sind die Kolonnenteilnehmer über den Beitritt des Lkw in die bestehende Fahrzeugkolonne informiert. Der Kolonnenregler muss dabei vorgeben, an welcher Position der Fahrzeugfolgeabstand für den Beitritt vergrößert wird. Sobald der Fahrer des blauen Lkw sein Fahrzeug neben der Lücke platziert hat, wird er aufgefordert, die Steuerung an das System zu übergeben, die das Fahrzeug selbstständig in die endgültige Position innerhalb der Kolonne bringt.

Die Integration eines Lkw, wie sie in Abbildung 52 zu sehen ist, ist nur möglich, wenn die Kolonne langsamer als die zulässige Höchstgeschwindigkeit für Lkw unterwegs ist. Für das Szenario eines Lkw-Beitritts ist es notwendig, dass kooperative Handlungsstrategien entworfen werden. Diese Strategien können beispielsweise vorsehen, dass die Geschwindigkeit der Kolonne kurzzeitig für den Zeitraum der Integration reduziert wird, um den Vorgang zügig abschließen zu können.

Für die Integration eines Reisebusses kann auf bereits vorgestellte Handlungsstrategien zurückgegriffen werden. Im Falle einer reinen Lkw-Kolonne oder einer Kolonne mit Lkw und Reisebussen kann sich der hinzukommende Reisebus an das hintere Folgefahrzeug koppeln. Falls der Reisebus allerdings vor einer der genannten Kolonnen fährt, so muss er von den Lkw überholt werden, um sich an deren Ende anzuschließen. Bei gemischten Fahrzeugkolonnen, bestehend aus Lkw, Reisebus und Pkw ist für die Integration stets ein Überholmanöver in analoger Art und Weise zu Abbildung 51 und Abbildung 52 notwendig.

9.1.2.3 Beitritt in eine Kolonne mit Reisebus-Führungsfahrzeug

Eine Fahrzeugkolonne mit einem Reisebus als Führungsfahrzeug erlaubt die Aufnahme eines Pkw oder eines anderen Reisebusses als neuen Kolonnenteilnehmer. Die Handlungsstrategien für einen Beitritt in eine Reisebus-geführte Kolonne werden bereits in den vorangehenden Abschnitten des Kapitels 9.1.2 erläutert. An dieser Stelle soll daher nur das grundlegende Vorgehen angesprochen werden.

Der Beitritt eines Reisebusses erfolgt bei einer reinen Bus-Kolonne entweder dadurch, dass sich der neue Kolonnenteilnehmer hinter dem letzten Folgefahrzeug platziert, sofern er sich zuvor hinter der Kolonne befindet, oder dass er sich vom Führungsfahrzeug überholen lässt, wenn er sich vor der Bus-Kolonne befindet (analog Abbildung 49 auf Seite 137). Für den Fall, dass sich ein beitretender Reisebus hinter einer inhomogenen Fahrzeugkolonne aus Pkw und Reisebussen befindet, muss er für den Kolonnenbeitritt alle Pkw überholen und sich hinter dem letzten Reisebus in einer Lücke einordnen (analog Abbildung 52 auf Seite 142).

Die Handlungsstrategien für den Beitritt eines potentiellen Folgefahrzeugs zu einer bestehenden Fahrzeugkolonne orientieren sich dabei stets an den Prämissen, dass die richtige Reihenfolge von Lkw, Reisebussen und Pkw eingehalten wird, sowie dass notwendige Überholmanöver so durchzuführen sind, dass sie für eine möglichst kurze Belegung anderer Fahrstreifen sorgen.

9.1.3 Anpassung einer Kolonne

Unter „Anpassung einer Kolonne“ wird im Folgenden die Reaktion einer bestehenden Fahrzeugkolonne auf eine sich ändernde Situation verstanden. In diesem Kapitel werden mögliche Handlungsstrategien für vier verschiedene Szenarien vorgestellt, die eine Anpassung der Kolonne erfordern.

9.1.3.1 Interaktion an Steigungen

An Steigungsstrecken besteht die Gefahr, dass einzelne Fahrzeuge innerhalb der Kolonne die eingestellte Geschwindigkeit nicht mehr halten können, worauf die Kolonne zu einer Reaktion gezwungen ist. Je nach Fahrzeug können sowohl Lkw, Reisebusse als auch Pkw betroffen sein. Die Fähigkeit, eine bestimmte Geschwindigkeit auch an Steigungen beizubehalten, ist hauptsächlich beeinflusst durch die Höhe der Geschwindigkeit, die Höhe der Steigung, die absolute Motorleistung und den Beladungszustand des Fahrzeugs, siehe auch Kapitel 8.2.3.1. Im Fall einer Geschwindigkeitsabnahme in der Fahrzeugkolonne kann zwischen drei Fällen unterschieden werden:

- *Variante 1:* Das Führungsfahrzeug kann die Geschwindigkeit nicht halten.
- *Variante 2:* Das letzte Folgefahrzeug kann die Geschwindigkeit nicht halten.
- *Variante 3:* Eines der Folgefahrzeuge im Inneren der Kolonne kann die die Geschwindigkeit nicht halten.

Bei *Variante 1* verlangsamt sich die gesamte Kolonne aufgrund nicht ausreichender Motorleistung des Führungsfahrzeugs. *Variante 2* hätte zur Folge, dass das letzte Folgefahrzeug den Kontakt zur Fahrzeugkolonne verliert und der Fahrer die Fahrzeugsteuerung wieder übernehmen muss. *Variante 3* führt zu einem Bruch innerhalb der Kolonne, so dass mehrere Fahrzeuge aus der Kolonne ausscheiden.

Kooperative Kolonnenregelung

Um ein Aufziehen der Kolonne sowie ungewollte Kolonnenaustritte zu verhindern, ist es an Steigungsstrecken bei Unterschreiten der Kolonnengeschwindigkeit erforderlich, die Geschwindigkeit des „schwächsten“ Kolonnenteilnehmers als Kolonnengeschwindigkeit zu übernehmen. Der ständige Echtzeit-Datenaustausch der Kolonnenteilnehmer

erlaubt es, eine Geschwindigkeitsreduktion eines einzelnen Fahrzeugs sofort zu erkennen und diese Information innerhalb der Kolonne zu teilen. Da die Geschwindigkeitsreduzierung zu verkürzten Reaktionswegen führt, kann der Kolonnenregler im Führungsfahrzeug mit der Vorgabe von geringeren Fahrzeugfolgeabständen reagieren, siehe auch Kapitel 8.2.3.2.

Fahrer der Folgefahrzeuge haben stets die Möglichkeit, die Kolonne zu verlassen. Sie können über das HMI den Austritt aus der Kolonne anmelden, wenn sie beispielsweise mit der aktuellen verringerten Fahrgeschwindigkeit unzufrieden sind. Um jedoch vorschnelle oder unüberlegte Entscheidungen von Fahrern der Folgefahrzeuge zu vermeiden, kann auf Routeninformationen und das Kartenmaterial des Navigationssystems zurückgegriffen werden. Diese Daten ermöglichen es, ein Höhenprofil der weiteren Fahrtroute zu erstellen, welches in Verbindung mit der Kenntnis über die fahrzeugeigene Leistungsfähigkeit die Ermittlung eines Geschwindigkeitsprofils für die anstehende Bergfahrt erlaubt[14]. Dieses Geschwindigkeitsprofil bildet die Grundlage für die Berechnung eines Zeitverlusts infolge der Verlangsamung eines Fahrzeugs. Der berechnete Zeitverlust kann den Fahrern der Folgefahrzeuge im Cockpit angezeigt werden, um die Fahrer bei der Entscheidung über einen Verbleib oder Austritt aus der Kolonne zu unterstützen, siehe Abbildung 53.

Abbildung 53: Anzeigefeld zur Unterstützung des Fahrers eines Folgefahrzeugs bei der Entscheidung über Verbleib oder Austritt aus der Kolonne. (In Anlehnung an BMW, 2013b)

[14] Die maximal mögliche Geschwindigkeit bei gegebener Steigung kann mithilfe eines einfachen Simulationsmodells des Fahrzeugs ermittelt werden. Externe Eingangsgröße ist die Steigung des Höhenprofils. Antriebsseitige Eingangsgrößen sind Motordrehmoment und -drehzahl sowie der Wirkungsgrad des Antriebsstrangs. Weitere Eingangsgrößen sind der Rollwiderstandsbeiwert, der Drehmassenzuschlagsfaktor, die aktuelle Beschleunigung, die Fahrzeugstirnfläche, die Luftdichte und der Luftwiderstandsbeiwert (vgl. Haken, 2008). Die Masse des Fahrzeugs ist stark beladungsabhängig und vorab ebenfalls über ein Modell zu identifizieren (vgl. Banerjee et al., 2013); siehe auch Kapitel 8.2.3.1.

Für das in Abbildung 53 dargestellte Beispiel wird eine relativ lange Steigungsstrecke mit einer Länge von 8 km und eine Reduktion der Kolonnengeschwindigkeit von 80 auf 55 km/h angenommen. Das Ergebnis zeigt, dass sich dabei lediglich ein Zeitverlust von 3 min ergibt. Ohne den Hinweis wird ein Fahrer, der zwar gerne an einer Fahrzeugkolonne teilnimmt, aber gleichzeitig möglichst schnell sein Reiseziel erreichen möchte, vermutlich überholen wollen. Der Hinweis im Anzeigefeld zeigt ihm jedoch, dass der Zeitverlust aufgrund der geringeren Geschwindigkeit während der Steigungsfahrt äußerst gering ist und ein Kolonnenaustritt zeitlich nur geringe Vorteile bringt. Um die Anzahl an Fahrmanövern zum Kolonnenbeitritt und Kolonnenaustritt nicht zu erhöhen, sollen so unnötige Kolonnenaustritte vermieden werden.

Das oben beschriebe Vorgehen einer kooperativen Kolonnenregelung stellt eine geeignete Lösungsmöglichkeit für die Interaktion innerhalb der Fahrzeugkolonne dar. Um die angesprochene Problematik der Verlangsamung einzelner Fahrzeuge bei der Steigungsfahrt zu entschärfen, sind auch fahrzeugseitige Optimierungen umsetzbar. Die Möglichkeit, eine höhere Geschwindigkeit zu erreichen, macht die Kolonnenfahrt auf Steigungsstrecken zuverlässiger und komfortabler. Die ZF Friedrichshafen AG bietet hierfür eine intelligente Getriebesteuerung für den Einsatz in Lkw an. Diese bezieht die Topographie der Fahrtroute in die Festlegung der Schaltstrategie mit ein. So wird beispielsweise bereits vor einer längeren Steigung zurückgeschalten, um einen Schaltvorgang während der Steigungsfahrt und die damit verbundene Zugkraftunterbrechung zu vermeiden. Die vorausschauende Getriebesteuerung erlaubt eine Gangwahl, die etwa der eines Lkw-Fahrers mit ausgeprägter Streckenkenntnis entspricht (vgl. Banerjee et al., 2013). Ähnliche Systeme zur intelligenten Getriebesteuerung sind auch für Reisebusse und Pkw denkbar. Es ist festzuhalten, dass die Getriebesteuerung die maximale Leistung des Motors nicht verändern kann. Sie führt jedoch dazu, dass die zur Verfügung stehende Leistung möglichst optimal eingesetzt wird.

Kolonnenregelung bei sehr langsamen Kolonnenteilnehmern

Für die kooperative Kolonnenregelung, die auf die Leistungsfähigkeit des schwächsten Fahrzeugs Rücksicht nimmt, sollten Einsatzgrenzen definiert sein. So ist beispielsweise zu überlegen, inwiefern es bei einer Kolonne mit mehreren Lkw sinnvoll erscheint, wenn ein einzelner bezüglich seiner Leistungsfähigkeit deutlich hinter den anderen Kolonnenteilnehmern zurückbleibt und die Kolonne aufgrund dessen ihre Geschwindigkeit drastisch reduzieren muss. An dieser Stelle sei als Beispiel der Albaufstieg der A8 zwischen Stuttgart und Ulm genannt. Dabei handelt es sich um einen Streckenabschnitt, der aufgrund seiner Steilheit die Geschwindigkeit mancher Lkw für mehrere Kilometer auf etwa 30 km/h reduziert (vgl. Sautter, 2012). Auch wenn dieses Beispiel einen seltenen Extremfall darstellt, kann über die Ausarbeitung spezieller Handlungsstrategien für solche Situationen nachgedacht werden. Diese sollen nachfolgend in verkürzter Form erwähnt, sowie deren Problematik erläutert werden.

Bei *Variante 1* verlangsamt sich das Führungsfahrzeug und somit die gesamte Kolonne, wobei jedem Folgefahrzeug die Wahl freigestellt ist, dem Führungsfahrzeug weiterhin zu folgen oder aus der Kolonne auszutreten. Aufgrund der Gefahr großer Geschwindigkeitsdifferenzen zu anderen Verkehrsteilnehmern, sollten Kolonnenaustritte dann stattfinden, solange sich die Geschwindigkeit des Führungsfahrzeugs noch nicht zu sehr reduziert hat. Um die Fahrer der Folgefahrzeuge rechtzeitig über eine drastische Geschwindigkeitsreduzierung zu informieren, kann auf die oben angesprochenen Geschwindigkeitsprofile zurückgegriffen werden.

Bei *Variante 2* ist das letzte Folgefahrzeug der Kolonne von der Verlangsamung betroffen. Der Kolonnenregler kann mithilfe der errechneten Geschwindigkeitsprofile für die anstehende Steigungsfahrt entscheiden, ob die Kolonnengeschwindigkeit reduziert wird (kooperative Kolonnenregelung), oder ob die Steuerung des letzten Folgefahrzeugs an den Fahrer zurückgegeben wird und dieser die Kolonne verlässt. Da ein Kolonnenaustritt des hinteren Folgefahrzeugs ohne Nutzung weiterer Fahrstreifen umsetzbar ist, ergeben sich keine weiteren Nachteile für andere Verkehrsteilnehmer. Die Entscheidung, in welchen Situation sich die Kolonnenregelung kooperativ verhält, ist davon abhängig, wie stark der Geschwindigkeitsabfall im Vergleich zu den anderen Kolonnenteilnehmer ausfällt, wie lang die Steigungsstrecke ist und wie viele Minuten der Zeitverlust beträgt. Es ist auch denkbar, wirtschaftliche Überlegungen in die Entscheidung mit einzubeziehen: Ist es wirklich effizient, wenn mehrere Fahrzeuge aufgrund eines einzelnen langsamen Fahrzeugs einem Zeitverlust von mehreren Minuten in Kauf nehmen müssen? Schließlich kann sich das langsame Fahrzeug nach der Steigungsstrecke auch einer anderen Kolonne anschließen.

Bei *Variante 3* ist eines der Folgefahrzeuge im Inneren der Kolonne von einer drastischen Geschwindigkeitsreduktion betroffen. Auch hier ist wieder zu entscheiden, ob eine kooperative Kolonnenregelung angemessen ist. Wird die kooperative Kolonnenregelung als nicht zielführend erachtet, sind die nachfolgend aufgeführten Möglichkeiten als Reaktion der Fahrzeugkolonne denkbar. Alternativ kann die Fahrzeugreihenfolge bereits beim Kolonnenbeitritt in gewissen Grenzen berücksichtigt werden.

- *Variante 3.1: Kolonnenaustritt:* Das langsame Fahrzeug kann den Vorausfahrenden nicht mehr folgen, worauf die Steuerung an den Fahrer zurückgegeben wird, womit er automatisch die Kolonne verlässt. Selbiges gilt für die Folgefahrzeuge, die sich hinter dem langsamen Fahrzeug befinden. Daraufhin ist es möglich, dass sie das langsame Fahrzeug überholen und sich der Kolonne erneut anschließen.
- *Variante 3.2: Automatisierter Platztausch:* Während sich der Abstand vor dem langsamen Fahrzeug vergrößert, ist es denkbar, dass dieses Fahrzeug von den nachfolgenden schnelleren Kolonnenteilnehmern überholt wird und diese die Lücke schließen. Je nach Systemausprägung sind die Fahrstreifenwechsel der hinteren Folgefahrzeuge mit oder ohne Überwachung durch den Fahrer darstellbar. Im Fall einer Überwachungspflicht durch den Fahrer muss dieser zuvor

auf das Überholmanöver hingewiesen werden und die Überwachung bestätigen. Bleibt diese Bestätigung aus oder ist ein automatisierter Überholvorgang beispielweise aufgrund der Verkehrslage nicht möglich, muss auf Variante 3.1 zurückgegriffen werden.

Während die vorgestellten Möglichkeiten für den Umgang mit sehr langsamen Fahrzeugen bei Variante 1 (Führungsfahrzeug verlangsamt sich) und bei Variante 2 (letztes Folgefahrzeug verlangsamt sich) keinen wesentlichen Einfluss auf die Kolonnenfahrt haben, ergeben sich bei Variante 3 deutliche Auswirkungen. Auf der einen Seite sind die Folgefahrzeuge hinter dem langsamen Fahrzeug betroffen, die gegebenenfalls ihren automatisierten Fahrmodus verlassen müssen, auf der anderen Seite können übrige Verkehrsteilnehmer durch Überholmanöver beeinträchtigt werden. Um dies zu vermeiden, sind vollautomatisierte Überholmanöver, die zuverlässig unter Rücksichtnahme anderer Verkehrsteilnehmer durchgeführt werden, notwendig. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Umsetzung von vollautomatisierten Überholmanövern in einer Fahrzeugkolonne weitaus komplexer ist, als eine reine Längsregelung in Verbindung mit einem Fahrerassistenzsystem zur Spurführung. Eine spezielle Kolonnenregelung für den hier beschriebenen Extremfall ist daher als Add-On zur kooperativen Kolonnenregelung zu sehen, sobald die technischen Voraussetzungen für vollautomatisierte Überholmanöver der Folgefahrzeuge gegeben sind.

9.1.3.2 Interaktion bei schlechten Straßenverhältnissen

Schlechte Straßenverhältnisse in Form von verringerten Reibwerten durch Schnee, Eis oder Nässe stellen für eine autonome Fahrzeugkolonne schwer zu regelnde Zustände dar. Zu kritischen Situationen kann es besonders dann kommen, wenn die Reibwertänderung ohne Vorankündigung auftritt. In diesem Kapitel sollen daher Möglichkeiten genannt werden, wie eine Fahrzeugkolonne auf schlechte Straßenverhältnisse reagieren kann.

Eine optimale Reaktion ist dann möglich, wenn die Kolonnenteilnehmer bereits informiert sind, ehe sie einen gefährlichen Streckenabschnitt erreichen. Alle vorausfahrenden Fahrzeuge, die über Kommunikationsmöglichkeiten verfügen, können dabei als Informanten dienen. Für die Warnmeldungen werden Daten zum Radschlupf aus dem Steuergerät des Fahrdynamikreglers abgegriffen und mit dem Scheibenwischer- und Temperatursignal verknüpft, siehe Kapitel 4.2.1. So ist eine Detektion möglich, ob es sich um Schnee- oder Eisglätte oder um Gefahr durch Nässe handelt. Zudem ist der Beginn des gefährlichen Streckenabschnitts sowie gegebenenfalls dessen Ende mittels GPS exakt zu bestimmen, siehe Kapitel 4.2.2. Eine Warnmeldung mit den genannten Informationen wird daraufhin via C2CC in einem festgelegten Gebiet vor dem betroffenen Streckenabschnitt, an andere kommunikationsfähige Fahrzeuge übermittelt. Zudem können die Informationen über im Fahrzeug vorhandene Mobilfunkmodule an

Verkehrsleitzentralen gesendet werden, worauf die Meldung in die Verkehrsnachrichten aufgenommen sowie mit dem Radio- oder Mobilfunksignal an andere Verkehrsteilnehmer ohne C2CC übermittelt wird, siehe Kapitel 5.3.

Gefahr durch Nässe besteht hauptsächlich dann, wenn Wasser auf der Fahrbahnoberfläche nicht mehr abfließt, wodurch es zum Aufschwimmen der Reifen („Aquaplaning“) kommen kann. Da an den betroffenen Reifen weder Längs- noch Querkräfte übertragen werden können, ist das Fahrzeug nicht mehr steuerbar und dieser Zustand somit unbedingt zu vermeiden. Die Gefahr des Aufschwimmens ist stark geschwindigkeitsabhängig, so dass die Fahrzeugkolonne lediglich vorab ihre Geschwindigkeit anpassen muss. Die Fahrzeugfolgeabstände sollten vergrößert werden, da sich die Bremswege der Kolonnenteilnehmer bei Nässe deutlich unterscheiden können. Verantwortlich hierfür sind einerseits der Zustand des Reifens in Form der Profiltiefe sowie dessen sonstigen Nässeeigenschaften (vgl. Haken, 2008) und andererseits das Fahrzeuggewicht. Ein Pkw beginnt daher bei gleicher Geschwindigkeit aufgrund seines geringeren Gewichts weitaus früher aufzuschwimmen als ein Lkw.

Erreicht die Fahrzeugkolonne eine Meldung zu Schnee- oder Eisglätte, so ist die Kolonne bis zum Erreichen des gefährlichen Streckenabschnitts auf Vorgabe des Kolonnenreglers standardmäßig aufzulösen, siehe auch Kapitel 9.1.5. Hierzu werden die Fahrzeugfolgeabstände kontinuierlich vergrößert, die Geschwindigkeit den zu erwartenden Verhältnissen angepasst und die Steuerung der Fahrzeuge an die Fahrer übergeben. Für diese drastische Maßnahme sind mehrere Gründe verantwortlich. Zum einen ist die autonome Querregelung der Fahrzeuge nicht mehr möglich, wenn Fahrstreifenmarkierungen aufgrund von Schnee nicht mehr erkannt werden, zum anderen können sich Fahrzeuge auf eisiger Fahrbahn sehr unterschiedlich verhalten, so dass es der Sicherheit dienlich ist, wenn größere Folgeabstände zwischen den Fahrzeugen vorliegen und die Steuerung des Fahrzeugs in solchen Situationen an den Fahrer zurückgegeben wird.

Erfolgt keine Vorabinformation zu Schnee- und Eisglätte, so dass das Führungsfahrzeug das erste Fahrzeug ist, das die Gefahrenstelle erkennt, ist die Kolonne unverzüglich aufzulösen. Aufgrund der oben genannten Gründe ist eine sichere Kolonnenfahrt nicht mehr gegeben. Mit Erkennen der Gefahrenstelle müssen die Fahrer der Folgefahrzeuge zur Übernahme der Fahrzeugsteuerung unmittelbar, aber auch sanft „aktiviert“ werden, um eine schreckhafte Übernahmereaktion zu vermeiden. Direkt nach Erkennen der Gefahrenstelle unterstützt der Kolonnenregler weiterhin die Folgefahrzeuge, um die Geschwindigkeit zu reduzieren und die Abstände zwischen den Fahrzeugen zu vergrößern, bis die Fahrer endgültig die Steuerung übernehmen. Auch wenn die Fahrstreifenmarkierung nicht mehr sichtbar ist, muss es dem System in dieser kurzen Zeitspanne möglich sein, dass ein Fahrzeug einem anderen autonom folgt.

Sofern bei entsprechend starkem Regen keine Warnmeldungen zu Aquaplaning übermittelt werden, kann der Kolonnenregler dennoch die Geschwindigkeit in Abhängigkeit

des Regensensorsignals anpassen und somit die weitere Kolonnenfahrt auch bei Aquaplaninggefahr sicherstellen. Eine kritische Situation kann sich theoretisch dann ergeben, wenn ein Regenschauer bereits vorbei ist und sich an einigen Stellen dennoch viel Wasser auf der Fahrbahn befindet. Allerdings ist in diesem Fall davon auszugehen, dass bereits ein anderer Verkehrsteilnehmer vorab diese Stelle erkannt hat und dies via C2CC weitergibt. Sollte die Kolonne dennoch nicht vorgewarnt sein, so wird die Geschwindigkeit auf Vorgabe des Kolonnenreglers sofort auf ein sinnvolles Maß reduziert und der Folgeabstand zwischen den Kolonnenteilnehmern vergrößert. Eine Übergabe an den Fahrer ist nicht notwendig, da die weitere verlangsamte Kolonnenfahrt vom Regen oder dem Wasser auf der Straße nicht wesentlich beeinflusst wird.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Kolonne aufgelöst werden muss, sobald eine zuverlässige Umfelderfassung nicht mehr möglich ist. Fahrzeuge in einem vollautomatisierten Fahrmodus sind darauf angewiesen, dass alle „Sinne“ zur Umfelderfassung genutzt und die erfassten Daten sinnvoll miteinander verknüpft werden (siehe Kapitel 6). Nur so kann ein umfassendes Verständnis für die Fahrsituation geschaffen werden. Dieses Verständnis ist jedoch bei verschneiten Fahrbahnen, starker Gischt oder bei blendender Sonne auf nasser Fahrbahn nicht mehr gegeben, sodass eine Übergabe an den Fahrer in diesen Situationen der Aufrechterhaltung der Verkehrssicherheit dient.

9.1.3.3 Interaktion bei wechselnden Verkehrszuständen

Die Geschwindigkeit einer Fahrzeugkolonne wird prinzipiell vom Führungsfahrzeug bei Kolonnenbildung festgelegt. An Steigungen, bei schlechter Witterung oder einer Begrenzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit muss diese Geschwindigkeit gegebenenfalls angepasst werden. Einen weiteren Grund für eine notwendige Geschwindigkeitsanpassung stellt die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern dar. In diesem Kapitel soll das mögliche Kolonnenverhalten bei wechselnden Verkehrszuständen wie freiem, teilgebundenem und gebundenem Verkehr angesprochen werden.

Während bei freiem Verkehrsfluss keine Beeinträchtigung für die Fahrzeugkolonne zu erwarten ist und auch Überholmanöver durchführbar sind, muss im teilgebundenen Verkehr die Geschwindigkeit häufiger an vorausfahrende Fahrzeuge angepasst werden. Überholmanöver sind für die Kolonne – je nach Länge – nur unter Umständen möglich. Die Regelung der Kolonnengeschwindigkeit erfolgt bei Beeinflussung durch vorausfahrende Verkehrsteilnehmer durch den Abstandsregeltempomat des Führungsfahrzeugs. Er ist für ein komfortables Bremsen und Beschleunigen der Kolonne verantwortlich. Bei einer noch höheren Verkehrsstärke ist die Kolonnengeschwindigkeit vollständig von den umgebenen Fahrzeugen abhängig. Überholmanöver sind aufgrund der Verkehrsdichte, aber auch aufgrund der sehr ähnlichen Geschwindigkeiten auf allen Fahrstreifen, nicht mehr sinnvoll beziehungsweise nicht mehr möglich. Wann die-

ser gebundene Verkehrszustand vorliegt, ist beispielsweise über die Anzahl der im eigenen Netzwerk befindlichen Fahrzeuge und die ausgetauschten Informationen zur Geschwindigkeit anderer Fahrzeuge bestimmbar. Sobald die Verkehrsdichte weiter zunimmt, ist es wichtig, die Kolonnengeschwindigkeit nicht nur am direkt vor der Kolonne vorausfahrenden Fahrzeug auszurichten, sondern mittels C2CC auch Brems- und Beschleunigungsmanöver weiter vorausfahrender Fahrzeuge zu erfassen. So können beispielweise starke Bremsvorgänge mit anschließenden Beschleunigungsphasen vermieden werden. Dies steigert einerseits den Fahrkomfort und bietet andererseits Vorteile für den Spritverbrauch und den Verkehrsfluss (vgl. Kapitel 10). Um die Geschwindigkeitsschwankungen eines vorausfahrenden Fahrzeugs ausgleichen zu können, ist ein ausreichender Sicherheitsabstand vor dem Führungsfahrzeug notwendig. Je kleiner die Kolonnengeschwindigkeit ist, desto kleiner dürfen die Abstände innerhalb der Kolonne eingeregelt werden. Die Abstände werden dabei im Stau und bei sehr langsamen Geschwindigkeiten auf ein Minimum reduziert (vgl. Robinson et al., 2010). Die Möglichkeit, viele Fahrzeuge auf einer kurzen Streckenlänge zu platzieren, löst einen Stau zwar nicht schneller auf, kann jedoch dafür sorgen, dass beispielsweise zurückliegende Ausfahrten nicht überstaut werden. Eine intelligente Kolonnenregelung kann somit – mit Ausnahme des freien Verkehrsflusses – positive Impulse für einen besseren Verkehrsfluss geben.

Im vorangegangenen Abschnitt wurde ein kontinuierlicher Übergang vom freien Verkehrsfluss bis hin zum Stau betrachtet. Die Kolonne wird dabei durch das steigende Verkehrsaufkommen und die damit verbundene Geschwindigkeitsreduktion verlangsamt. Es ist jedoch auch möglich, dass ein Stauende plötzlich und unvorhersehbar auftritt. Um hierbei kritische oder gefährliche Fahrmanöver zu vermeiden, ist es wiederum notwendig, rechtzeitig informiert zu sein, um die Geschwindigkeit frühzeitig reduzieren zu können. Die exakte Position des Stauendes kann dabei entweder mittels C2CC oder alternativ über Echtzeit-Verkehrsmeldungen übermittelt werden.

9.1.3.4 Interaktion bei Systemfehlern

Alle Teilnehmer einer Fahrzeugkolonne sind darauf angewiesen, dass sich die gesamte technische Ausstattung ihrer Fahrzeuge in einwandfreiem Zustand befindet. Die Verantwortung hierfür obliegt dem Halter. In Bezug auf die autonome Kolonnenfahrt sind dies im Einzelnen die Module Kommunikation und Bedienung sowie die Längs- und Querführung inklusive der dazugehörigen Sensorik, siehe Kapitel 8.1.1.

Um die Sicherheit des Systems zu gewährleisten, müssen alle Funktionen vollumfänglich nutzbar sein. Tritt an einer Systemkomponente ein Problem auf, so ist die Kolonnenteilnahme für das betroffene Fahrzeug ausgeschlossen, auch wenn redundante Komponenten vorhanden sein sollten. Diese sind nur für Notfallsituationen und nicht für den Regelbetrieb vorgesehen. Das heißt, dass die Anmeldung eines potentiellen Ko-

lonnenteilnehmers, egal ob als Führungs- oder als Folgefahrzeug, unterbunden wird, sobald die Fahrzeugdiagnose einen relevanten Fehler im System identifiziert hat. Der Fahrer soll bei Erkennen des Fehlers informiert werden. Es ist darüber hinaus denkbar, dass das Fahrzeug via Mobilfunk eine Nachricht an die Werkstatt sendet, die daraufhin den Fahrer für eine Terminabsprache kontaktiert und gegebenenfalls sofort die Bestellung eines Ersatzteils einleitet.

Ein Systemfehler kann dann problematisch werden, wenn dieser während der Kolonnenteilnahme auftritt. Das entsprechende Fahrzeug muss daraufhin zuverlässig und ohne Gefährdung anderer Verkehrsteilnehmer die Kolonne verlassen. Dabei muss generell zwischen den Folgefahrzeugen und dem Führungsfahrzeug unterschieden werden. Die Folgefahrzeuge befinden sich während der Kolonnenfahrt in einem hochautomatisierten Fahrmodus, in dem es den Fahrern erlaubt ist, Nebentätigkeiten auszuführen. Im Notfall kann daher für eine gewisse Zeit nicht auf den Fahrer als Rückfallebene zurückgegriffen werden. Das Führungsfahrzeug, wie es im Rahmen dieser Ausarbeitung betrachtet wird, befindet sich während der Kolonnenfahrt in einem assistierten oder teilautomatisierten Fahrmodus. Dabei müssen die Assistenzsysteme vom Fahrer überwacht werden. Im Gegenzug muss das Fahrzeug sicherstellen, dass der Fahrer seiner Überwachungspflicht nachkommt. Der Fahrer ist jedoch in den Regelkreis des Systems eingebunden, während er sich beim hochautomatisierten Fahren außerhalb des Regelkreises befindet und im Falle einer Störung zunächst auf die Übernahme des Fahrzeugs aufmerksam gemacht werden muss (vgl. Herrtwich, 2013).

Da an jeder Komponente des Systems verschiedenste Ausfälle und Störungen denkbar sind, können diese nicht alle erwähnt werden. Nachfolgend werden einige hiervon exemplarisch angesprochen, um Handlungsstrategien aufzuzeigen, die ein sicheres Verlassen des betroffenen Fahrzeugs aus der Kolonne gewährleisten. Wichtig ist dabei immer, dass das Fahrzeug den Mangel selbst erkennen kann und auch die anderen Kolonnenteilnehmer darüber informiert werden.

- *Fallbeispiel 1:* Ausfall eines Sensors zur Umfeldüberwachung
- *Fallbeispiel 2:* Sensordaten liefern falsche Signale
- *Fallbeispiel 3:* Ausfall der C2CC

Zunächst sollen Handlungsstrategien betrachtet werden, bei denen eines der Folgefahrzeuge von einem Defekt betroffen ist. Der Ausfall eines Sensors zur Umfeldüberwachung, wie er in *Fallbeispiel 1* erwähnt wird, kann je nach Sensor zur Folge haben, dass beispielsweise der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug nicht mehr korrekt eingeregelt werden kann, Fahrstreifenwechsel nicht mehr möglich sind oder die Spurführung versagt. Bei Erkennen des Fehlers ist unverzüglich der Fahrer darauf aufmerksam zu machen und auf die Fahrzeugübernahme vorzubereiten. Gleichzeitig wird eine Meldung über den bevorstehenden Kolonnenaustritt an den Kolonnenregler im Führungsfahrzeug gesendet, sodass dieser wiederum die Folgefahrzeuge hinter dem betroffenen Fahrzeug informieren kann. Um die Übergabe der Fahrzeugsteuerung des

betroffenen Fahrzeugs an den Fahrer zu erleichtern, wird der Fahrzeugfolgeabstand vor dem Fahrzeug vergrößert, so dass er schließlich ausscheren kann und die Kolonne verlässt. Bei Ausfall eines Sensors zur Längsregelung kann für die Zeitdauer, in der die Folgeabstände vergrößert werden und die Übergabe der Steuerung an den Fahrer stattfindet, u.a. auf die Geschwindigkeitssignale der Kolonnenteilnehmer zurückgegriffen werden. Diese Signale werden ständig via C2CC zwischen den Fahrzeugen ausgetauscht und erlauben somit die Sicherstellung, dass ein Folgefahrzeug nie schneller als das Vorausfahrende fährt.

Bei Ausfall eines Sensors zur Querregelung kann es je nach Kurvigkeit der Strecke sehr wichtig sein, den Fahrer sofort darauf aufmerksam zu machen, damit dieser die Querführung des Fahrzeugs übernehmen kann. Bis zur Reaktion des Fahrers ist es denkbar, dass das Fahrzeug beispielsweise Lenkbefehle des vorausfahrenden Fahrzeugs übernimmt. Um eine falsche Kursänderung aufgrund unterschiedlicher Lenkcharakteristika zu vermeiden, können diese Lenksignale mit Daten zur Querbeschleunigung vorausfahrender Kolonnenteilnehmer abgeglichen werden.

In *Beispiel 2* wird von verfälschten Sensorsignalen ausgegangen. Im Unterschied zu Beispiel 1 ist hier der Sensor zwar weiterhin aktiv, seine Daten sind jedoch fehlerhaft. Um derartige Systemfehler identifizieren zu können, sind Softwarefunktionen und gegebenenfalls redundante Sensoren notwendig, die ständig die Plausibilität der Daten überwachen. Beispielsweise können verfälschte Sensorsignale erkannt werden, wenn sich ihre Werte in zu großem Maße abrupt ändern. Um keine unnötigen Warnmeldungen und Kolonnenaustritte zu provozieren, ist zunächst die Prüfung wichtig, ob die Werte über mehrere Messungen in Folge unplausibel erscheinen. Sofern dies der Fall ist, ist der Fahrer des betroffenen Fahrzeugs darüber zu informieren. Das weitere Vorgehen bezüglich des Kolonnenaustritts des betroffenen Fahrzeugs orientiert sich an Beispiel 1.

Bei *Beispiel 3* ist ein Defekt oder ein vorübergehender Ausfall des WLAN-Moduls in einem der Folgefahrzeuge denkbar, sodass dieses nicht mehr an der C2CC teilnehmen kann. Als Folge bekommt dieses Fahrzeug keine Informationen zum vorgesehenen Fahrzeugfolgeabstand oder erhält auch keine weiteren Hinweise. Für diesen Fall muss ein Notprogramm im betroffenen Fahrzeug vorliegen, so dass die Längsregelung auch ohne die Informationen aus dem Kolonnenregler den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug ausreichend vergrößern kann. Der Fahrer muss währenddessen auf die Übernahme der Fahrzeugsteuerung vorbereitet werden. Der Kolonnenregler muss ebenfalls auf die Eventualität vorbereitet sein, dass die Verbindung zu einem Kolonnenteilnehmer plötzlich abbrechen kann. Da er das Verhalten der Fahrzeugkolonne regelt, muss er stets Informationen über die Folgefahrzeuge sowie deren Position haben und erkennen können, welches Fahrzeug aufgrund der Störung die Kolonne verlässt. Diese Information kann wiederum an die Folgefahrzeuge übermittelt werden, die sich hinter der entstandenen Lücke befinden, damit sie wieder aufschließen können.

In den vorangehenden Ausführungen wurde stets ein Systemfehler in einem der Folgefahrzeuge betrachtet. Allerdings kann ein möglicher Defekt ebenso am Führungsfahrzeug der Kolonne auftreten. Da der Fahrer des Führungsfahrzeugs zur Überwachung der automatisierten Fahrfunktion seines Fahrzeugs verpflichtet ist, muss er im Falle eines Systemfehlers nicht erst zur Übernahme der Fahrzeugführung aufgefordert werden, sondern kann sofort eingreifen, wenn er beispielsweise aufgrund eines ausgefallenen Sensors nicht mehr von allen benötigten Assistenzsystemen unterstützt wird. Da die autonome Kolonnenfahrt jedoch für eine zuverlässige und komfortable Kolonnenregelung darauf aufbaut, dass auch das Führungsfahrzeug auf Assistenzsysteme zur Längs- und Querregelung zurückgreift, kann die Aufgabe des Führungsfahrzeugs nicht mehr korrekt wahrgenommen werden. Daher sollte die Kolonne aufgelöst werden. Der Kolonnenregler gibt diese Meldung an die Folgefahrzeuge weiter, die daraufhin die Fahrzeugfolgeabstände vergrößern und die Fahrzeugsteuerung an die Fahrer zurückgeben.

Für den Fall, dass das WLAN-Modul des Führungsfahrzeugs einen Defekt erleidet, müssen die Folgefahrzeuge erkennen können, dass die Verbindung zum Kolonnenregler abgebrochen ist. Die Folgefahrzeuge müssen daraufhin auf ein Notprogramm zurückgreifen, das die Zunahme der Abstände zwischen den Fahrzeugen regelt und die Fahrer wieder auf die Übernahme der Fahrzeugsteuerung vorbereitet.

Die in diesem Kapitel beschriebenen Handlungsstrategien würden sich bei Betrachtung weiterer Systemfehler in gleicher oder ähnlicher Form wiederholen. Es gilt, bei Erkennung eines Systemfehlers in einem der Folgefahrzeuge, die Steuerung des betroffenen Fahrzeugs an den Fahrer zurückzugeben und ihn beim Verlassen der Kolonne zu unterstützen. Dabei ist es stets wichtig, möglichst viele Informationen über das Verhalten einzelner Fahrzeuge innerhalb der Kolonne zu teilen, um eine sichere Kolonnenfahrt auch bei Störungen zu erlauben. Auch ein Ausfall der Kommunikationsmöglichkeit kann durch ein Notprogramm in Verbindung mit der Abstandsregelung für die Zeit der Fahrzeugübergabe an den Fahrer kompensiert werden. Ein Defekt am Führungsfahrzeug führt aus Sicherheitsgründen stets zur Auflösung der Fahrzeugkolonne.

9.1.4 Verlassen einer Kolonne

Unter Verlassen einer Kolonne wird gemäß der Definition in Kapitel 7.1 die Beendigung der Kolonnenteilnahme eines Folgefahrzeugs verstanden, wohingegen man vom Auflösen einer Kolonne spricht, wenn das Führungsfahrzeug die Kolonne verlassen möchte, siehe Kapitel 9.1.5.

Der Wunsch, eine Fahrzeugkolonne zu verlassen, kann verschiedene Gründe haben. Der häufigste Grund dürfte der Wunsch eines Folgefahrzeugs sein, die Autobahn an der nächsten Abfahrt zu verlassen. Denkbar ist auch, dass beispielsweise einige Pkw-Lenker die Kolonnenteilnahme lediglich auf Autobahnabschnitten mit Tempolimit oder

dichtem Verkehrsaufkommen nutzen, um danach wieder selbst die Fahrzeugsteuerung zu übernehmen. Beim Verlassen einer Kolonne kann zwischen den Handlungsstrategien für die folgenden drei Varianten unterschieden werden:

- *Variante 1:* Der hinterste Kolonnenteilnehmer verlässt die Kolonne.
- *Variante 2:* Ein Kolonnenteilnehmer aus dem Inneren der Kolonne verlässt die Kolonne auf freier Strecke.
- *Variante 3:* Ein Kolonnenteilnehmer verlässt die Kolonne an einer Ausfahrt.

Bei *Variante 1* meldet sich der Fahrer des hintersten Folgefahrzeugs von der Kolonne über das HMI ab. Dabei ist abzufragen, ob er die Kolonne sofort oder erst an der nächsten Ausfahrt verlassen möchte, siehe Variante 3. Daraufhin wird die Abmeldung an den Kolonnenregler im Führungsfahrzeug übermittelt und gegebenenfalls die Bezahlung der Kolonnenteilnahme vorgenommen. Der Kolonnenregler bestätigt den Kolonnenaustritt in einer Rückantwort. Da es sich hier um das hinterste Folgefahrzeug der Kolonne handelt, sind keine weiteren Informationen an die anderen Kolonnenteilnehmer notwendig. Beim Wunsch nach einem sofortigen Kolonnenaustritt beginnt das hinterste Folgefahrzeug – unmittelbar nach Erhalt der Bestätigung des Kolonnenreglers – automatisiert die Geschwindigkeit zu reduzieren und somit den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug zu vergrößern. Eine gesonderte Überprüfung der Aufmerksamkeit des Fahrers ist nicht mehr nötig, da dieser das Verlassen der Kolonne kurz zuvor aktiv angestoßen hat. Sobald der gesetzlich vorgeschriebene Mindestabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug erreicht ist, erfolgt die Übergabe der Fahrzeugsteuerung an den Fahrer. Dieser kann zwar weiterhin seine Fahrerassistenzsysteme zur Längs- und Querregelung nutzen, muss diese von nun an aber auch wieder überwachen.

Der Ablauf zur Abmeldung der Kolonnenteilnahme bei *Variante 2* verläuft zunächst analog zu Variante 1. Da es sich hier jedoch um ein Fahrzeug im Inneren der Fahrzeugkolonne handelt, sind auch alle Kolonnenteilnehmer hinter diesem Fahrzeug auf das bevorstehende Fahrmanöver vorzubereiten. Nachdem der Kolonnenregler den Wunsch zum Kolonnenaustritt registriert und die Rückantwort mit Informationen zum Ablauf des Manövers an die entsprechenden Fahrzeuge gesendet hat, beginnen diese mit der Reduzierung ihrer Fahrgeschwindigkeit, siehe Abbildung 54. Der Abstand vor dem Kolonnenteilnehmer, der die Kolonne verlässt, wird dadurch bis zum gesetzlich vorgeschriebenen Mindestabstand vergrößert. Daraufhin muss der Fahrer die Fahrzeugsteuerung übernehmen und sofern der linke Fahrstreifen frei ist, die Kolonne verlassen. Die Folgefahrzeuge dahinter verbleiben auf ihrem Fahrstreifen und schließen wieder zu den anderen Kolonnenteilnehmern auf, sobald dies möglich ist. Um den linken Fahrstreifen nicht unnötig zu blockieren, sollte das Fahrzeug, das die Kolonne verlässt, die anderen Kolonnenteilnehmer überholen.

Bei einem Lkw-Austritt ist aufgrund der geringen Geschwindigkeitsdifferenzen zu anderen Lkw ein kooperatives Verhalten der Kolonne notwendig, d.h., dass die Kolonnengeschwindigkeit auf Vorgabe des Kolonnenreglers kurzzeitig reduziert wird. So können

die sogenannten „Elefantenrennen“ vermieden werden. Das selbige Vorgehen ist auch nötig, wenn eine Kolonne bereits mit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf dem befahrenen Streckenabschnitt unterwegs ist. Es muss dem ehemaligen Kolonnenteilnehmer ermöglicht werden, den Überholvorgang ohne Überschreitung des Tempolimits in einem sinnvollen zeitlichen Rahmen abzuschließen.

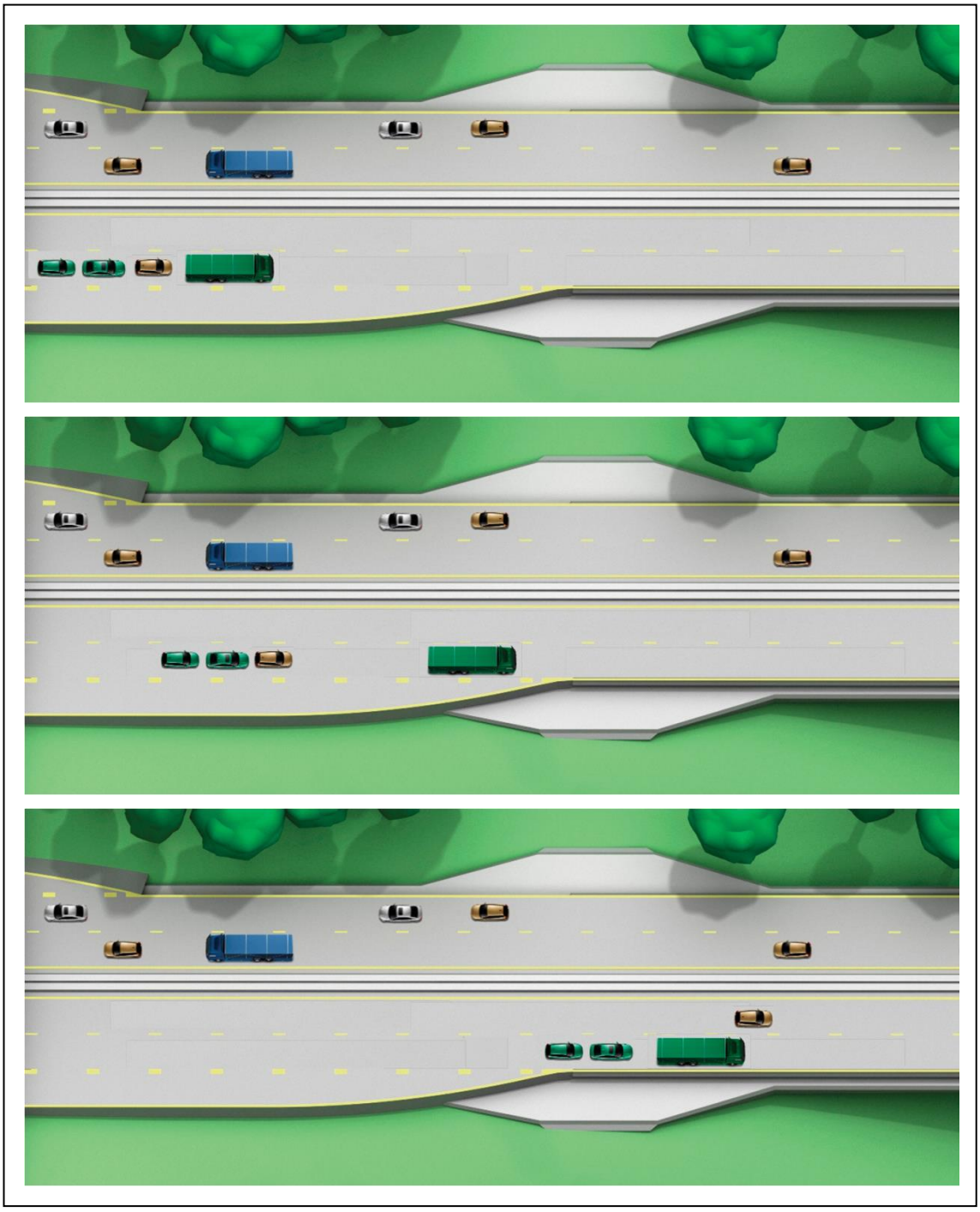


Abbildung 54: Verlassen einer Fahrzeugkolonne aus dem Inneren der Kolonne. (In Anlehnung an Ricardo, 2009)

Theoretisch ist es bei Variante 2 auch denkbar, dass ein Folgefahrzeug die Kolonne ohne vorherige Vergrößerung des Abstands zum vorausfahrenden Fahrzeug verlässt. Der Fahrer muss dabei die Querregelung beziehungsweise den Fahrstreifenwechsel des Fahrzeugs übernehmen, während die Längsregelung noch aktiv bleibt. Dies ist deshalb notwendig, da in den hier betrachteten Handlungsstrategien die Längsregelung dem System obliegt, sobald der gesetzlich vorgeschriebene Mindestabstand unterschritten ist. Dieses Vorgehen hat jedoch den Nachteil, dass das Fahrzeug, das die Kolonne verlässt, erst nach dem Fahrstreifenwechsel die Geschwindigkeit erhöhen kann. Je nach Verkehrslage und Geschwindigkeit der anderen Verkehrsteilnehmer kann es bei dieser Variante zu Konflikten kommen.

Bei *Variante 3* melden ein oder mehrere Kolonnenteilnehmer den Wunsch über das HMI an, die Kolonnenteilnahme an der nächsten Ausfahrt zu beenden. Es sind zunächst keine weiteren Anpassungen innerhalb der Kolonne notwendig. In ausreichender Entfernung vor der Ausfahrt gibt der Kolonnenregler den Folgefahrzeugen, die die Kolonne an dieser Ausfahrt verlassen möchten, eine Vergrößerung des Fahrzeugfolgeabstands auf den gesetzlich vorgeschriebenen Mindestabstand vor, sodass die Fahrer mit Beginn des Ausfädelungsstreifens die vollständige Kontrolle über die Längs- und Querregelung ihres Fahrzeugs übernehmen können. Die Aufmerksamkeit der Fahrer ist vorab, beispielweise durch eine Abfrage, ob das Signal des Fahrtrichtungsanzeigers aktiv ist, nochmals zu überprüfen. Gegebenenfalls muss er darauf aufmerksam gemacht werden. Nachdem die ausfahrenden Fahrzeuge die Kolonne verlassen haben und auch der Bereich der Autobahneinfahrt passiert ist, werden die Fahrzeugfolgeabstände der verbliebenen Kolonnenteilnehmer wieder auf den vom Kolonnenregler vorgesehenen Wert eingeregelt.

9.1.5 Auflösen einer Kolonne

Gemäß der Definition aus Kapitel 7.1 bezeichnet man eine Kolonne als aufgelöst, wenn das Führungsfahrzeug die Kolonnenführung beendet oder das letzte verbleibende Folgefahrzeug die Kolonne verlässt.

Meldet sich das letzte verbleibende Folgefahrzeug von der Kolonnenteilnahme ab, ist dieselbe Handlungsstrategie anzuwenden, wie wenn das hinterste Kolonnenfahrzeug die Kolonne verlässt, siehe Kapitel 9.1.4, Variante 1. Es ist dem Fahrer des Führungsfahrzeugs freigestellt, ob er weiterhin in seinem Fahrmodus verbleiben möchte, sodass sich andere potentielle Folgefahrzeuge anschließen können (siehe Kapitel 9.1.1) oder ob er die Bereitschaft zur Kolonnenführung zurückzieht. Daraufhin wird das Senden von Meldungen zum Kolonnenbeitritt an potentielle Folgefahrzeuge eingestellt. Die Kolonne ist somit vollständig aufgelöst.

Sofern das Führungsfahrzeug im Kolonnenbetrieb die Bereitschaft zur Führung abmeldet, beispielsweise weil es die Autobahn an der nächsten Ausfahrt verlassen möchte,

muss eine Handlungsstrategie greifen, die die Auflösung der Kolonne regelt. Die Beendigung der Kolonnenführung kann über das HMI entweder aktiv vom Fahrer veranlasst werden oder er wird aufgrund seiner gewählten Route rechtzeitig darauf hingewiesen, die Auflösung der Kolonne anzustoßen. Der Kolonnenregler sendet daraufhin einen Hinweis an die Folgefahrzeuge. Sofern sich dort ein Fahrer innerhalb einer festgelegten Zeitspanne zur Übernahme der Kolonnenführung bereit erklärt, behalten alle dahinter befindlichen Fahrzeuge weiterhin den Status eines Folgefahrzeugs. Fahrer von Fahrzeugen, die sich vor dem neuen Führungsfahrzeug befinden – oder alle Fahrer, falls sich kein neues Führungsfahrzeug finden lässt – müssen jedoch auf die Übernahme der Fahrzeugsteuerung vorbereitet werden. Das Fahrzeug muss dabei über Möglichkeiten verfügen, die Aufmerksamkeit des Fahrers zu überprüfen. Es bietet sich an, dass der Fahrer die Aufforderung zur Übernahme des Fahrzeugs über das HMI bestätigen muss. Falls diese Bestätigung eine gewisse Zeit ausbleibt und somit nicht sichergestellt ist, dass der Fahrer die Fahrzeugführung übernehmen wird, soll der Nothalteassistent eingreifen und das Fahrzeug sicher auf dem Standstreifen anhalten, siehe Kapitel 6.1.3. Nach Bestätigung der Meldung zur Fahrzeugübernahme beginnt das Fahrmanöver zur Kolonnenauflösung.

Stellvertretend wird die Auflösung der gesamten Fahrzeugkolonnen betrachtet. Im generellen Ablauf ergeben sich jedoch keine Unterschiede, wenn sich ein bisheriges Folgefahrzeug als neues Führungsfahrzeug anbieten sollte und lediglich ein Teil der Kolonne aufgelöst werden muss. Bei der Kolonnenauflösung beginnt dabei das hinterste Fahrzeug automatisiert seine Geschwindigkeit zu reduzieren und somit den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug zu vergrößern. Die anderen Fahrzeuge folgen zeitlich versetzt. Um die Folgeabstände zwischen den Fahrzeugen parallel vergrößern zu können, muss das hinterste Folgefahrzeug die Geschwindigkeit am stärksten, und das vorderste Folgefahrzeug die Geschwindigkeit am schwächsten reduzieren. In Abbildung 55 ist dies beispielhaft für eine Pkw-Kolonne dargestellt. Die Höhe der Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den Fahrzeugen ist vom Kolonnenregler in Abhängigkeit der Anzahl der Kolonnenteilnehmer vorzugeben. Würde man, analog zu Abbildung 55, stets eine Schrittweite von 5 km/h wählen, hätte dies bei einer Kolonne mit zehn Folgefahrzeugen und einer Ausgangsgeschwindigkeit von 120 km/h zur Folge, dass der hinterste Kolonnenteilnehmer die Geschwindigkeit auf 70 km/h reduzieren müsste. Hier sind unbedingt sinnvolle Grenzen zu definieren, die jedoch variabel auf die Kolonnenlänge reagieren.

Da die Fahrtstrecke während der Kolonnenauflösung je nach Geschwindigkeit und Kolonnenlänge variiert, muss der Kolonnenregler den Fahrer des Führungsfahrzeugs rechtzeitig an die Einleitung des Auflösungsmanövers erinnern. Sobald durch die Geschwindigkeitsreduktion der Folgefahrzeuge der Abstand zum jeweils vorausfahrenden Fahrzeug dem gesetzlich vorgeschriebenen Mindestabstand entspricht, erfolgt die endgültige Übergabe der Fahrzeugsteuerung an den Fahrer, womit die Kolonne aufgelöst ist und die einzelnen Fahrzeuge ihre Wunschgeschwindigkeit im Rahmen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit wieder frei wählen können.

© VuV 2013

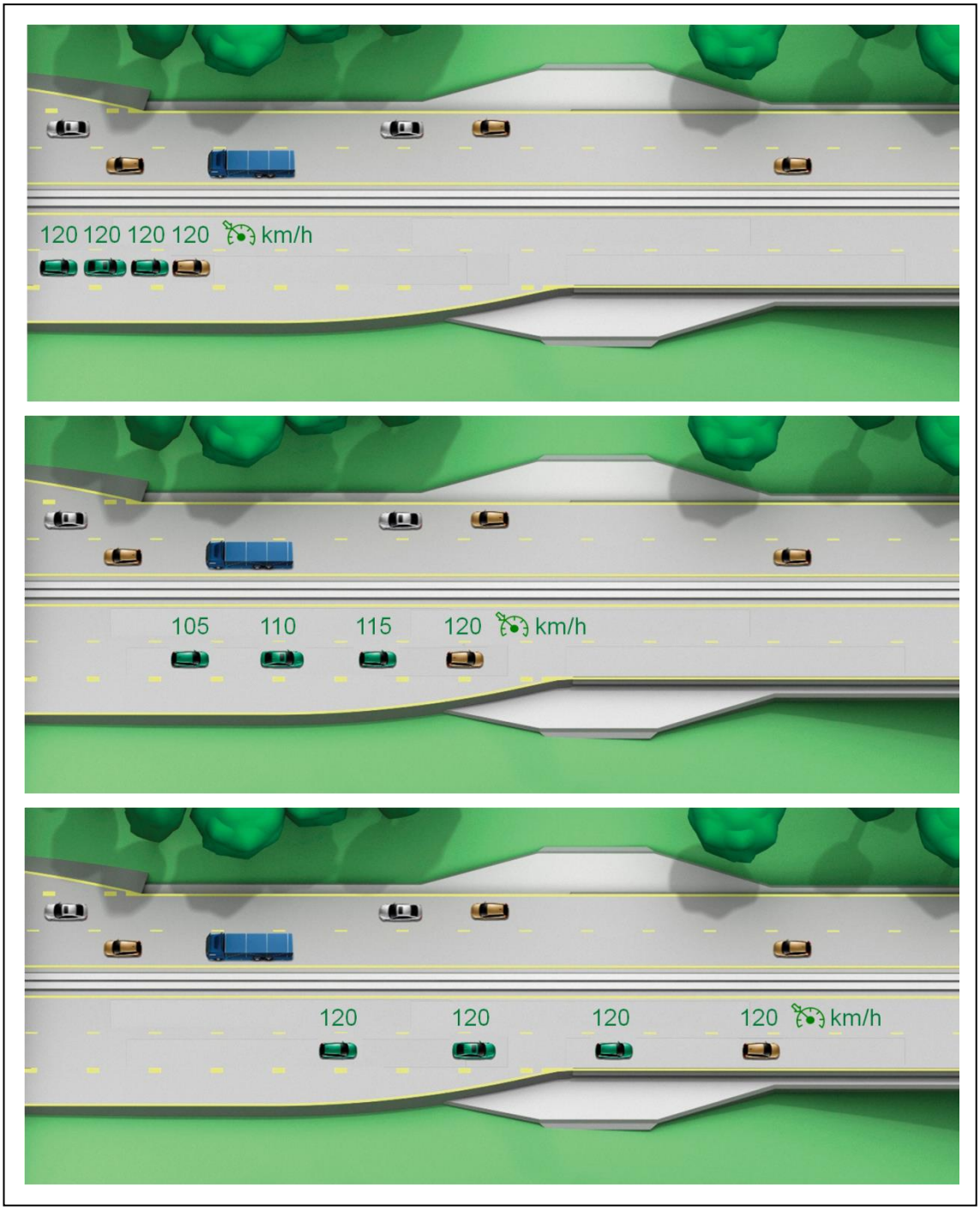


Abbildung 55: Auflösen einer Kolonne bei Beendigung der Kolonnenfahrt durch das Führungsfahrzeug. (In Anlehnung an Ricardo, 2009)

Die Zeitdauer für die Auflösung einer gesamten Kolonne nach dem hier beschriebenen Vorgehen und die dabei zurückgelegte Wegstrecke werden nachfolgend beispielhaft für Pkw-Kolonnen unterschiedlicher Länge berechnet. Dabei werden folgende Prämissen getroffen:

- Kolonnengeschwindigkeit: 120 km/h

- Fahrzeugfolgeabstand zu Beginn des Manövers: 10 m (in Anlehnung an Kapitel 8.2.4.3)
- Fahrzeugfolgeabstand am Ende des Manövers: 60 m (entspricht der halben Geschwindigkeit in Metern) [15]
- Maximal vorgesehene Geschwindigkeitsreduzierung des letzten Folgefahrzeugs: 20 km/h.

Abbildung 56 zeigt die zurückgelegte Wegstrecke während des Auflösemanövers in Abhängigkeit der Anzahl der Kolonnenteilnehmer. Um den Einfluss der Verzögerung der Folgefahrzeuge auf die untersuchten Parameter abzuschätzen, werden zwei verschiedene Verzögerungswerte gewählt.

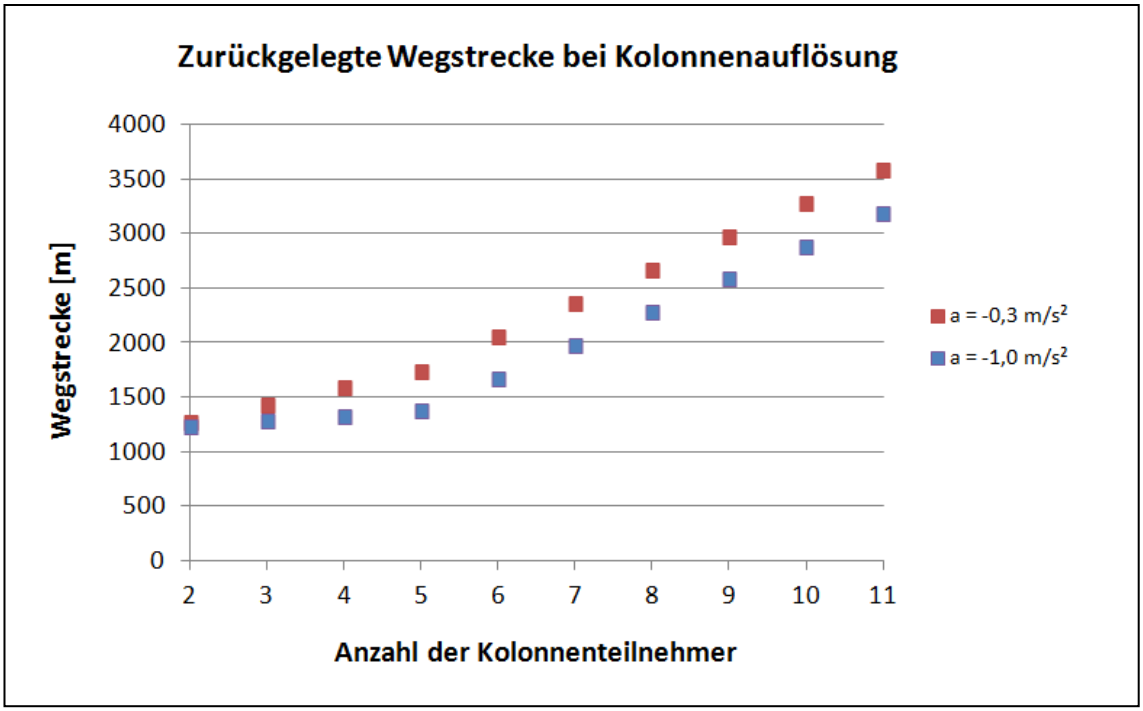


Abbildung 56: Zurückgelegte Wegstrecke bei 120 km/h während der Auflösung einer Pkw-Kolonne in Abhängigkeit der Anzahl der Kolonnenteilnehmer.

Die Ergebnisse in Abbildung 56 zeigen, dass mit den für die Berechnung getroffenen Annahmen die Kolonne innerhalb akzeptabler Wegstrecken aufgelöst werden kann. Die zurückgelegten Wegstrecken bewegen sich dabei von ca. 1250 m bis zu 3600 m bei einer schwachen bzw. bis zu 3200 m bei einer verstärkten Verzögerung. Die stär-

[15] Es wird dabei vernachlässigt, dass für die Folgefahrzeuge aufgrund ihrer geringeren Geschwindigkeit während des Manövers ein geringerer gesetzlich vorgeschriebener Mindestabstand ausreicht. Da bei der Berechnung des hier betrachteten Manövers jedoch das erste Folgefahrzeug hinter dem Führungsfahrzeug für die Maximaldauer verantwortlich ist und die Geschwindigkeit dieses Folgefahrzeugs nur geringfügig von der Kolonnengeschwindigkeit abweicht, entstehen nur kleine Fehler.

kere Verzögerung der Folgefahrzeuge führt dazu, dass die Folgefahrzeuge ihre Zielgeschwindigkeit für die Manöverauflösung schneller erreichen. Zu große Verzögerungen können jedoch in einem Zielkonflikt mit Komfort-Aspekten resultieren. Die Zeitdauern für das Auflösen der Kolonne verhalten sich analog zu den zurückgelegten Wegstrecken. Das Auflösen einer Fahrzeugkolonne aus zwei Kolonnenteilnehmern dauert etwa 40 s, während Kolonnen aus elf Teilnehmern je nach betrachteter Verzögerung ca. 95 bis 110 s benötigen. Im Hinblick auf die Ergebnisse für sehr lange Fahrzeugkolonnen mit mehr als acht Teilnehmern ist zu untersuchen, wie häufig mit solchen Kolonnen zu rechnen ist und ob ein derart langes Fahrmanöver sinnvoll erscheint. Der verstärkte Anstieg der Wegstrecke bei mehr als sechs Kolonnenteilnehmern resultiert aus der Beschränkung, dass das letzte Folgefahrzeug maximal 20 km/h langsamer als das Führungsfahrzeug fahren soll. Diese Vorgabe führt dazu, dass die Differenzgeschwindigkeiten zwischen den Fahrzeugen kleiner werden und somit mehr Zeit in Anspruch genommen wird, um den gewünschten Fahrzeugfolgeabstand herzustellen.

Es sei außerdem darauf hingewiesen, dass in der Systemauslegung für ein möglichst optimales Auflösemanöver mehrere Zielkonflikte zu berücksichtigen sind. So kann ein rasches Abbremsen der Folgefahrzeuge die Dauer des Manövers reduzieren, das anschließende Beschleunigen steigert jedoch den Kraftstoffverbrauch. Aus energetischer Sicht wäre es sinnvoller, wenn die Folgefahrzeuge den Abstand allein durch die Fahrwiderstände und das Motorschleppmoment vergrößern würden – ohne Betätigung der Bremsen. Es ist dabei zu überprüfen, inwiefern die relativ niedrigen Verzögerungen den Kraftstoffverbrauch beeinflussen, da bei größeren Fahrzeugfolgeabständen im Gegenzug die Vorteile des Windschattens reduziert werden. Des Weiteren kann die Topographie der vorausliegenden Strecke in Bezug auf ein energetisch optimales Auflösemanöver berücksichtigt werden.

Während des Auflösungsmanövers ist es auch denkbar, die Kolonnenteilnehmer nochmal abschließend im Anzeigedisplay zu informieren. So können beispielsweise die in der Kolonne zurückgelegte Fahrtstrecke angezeigt sowie die eingesparte Kraftstoffmenge abgeschätzt werden. Sofern ein Bezahlsystem eingesetzt wird, können im Führungsfahrzeug die Einnahmen und in den Folgefahrzeugen die Ausgaben dargestellt werden.

9.2 Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern

Während in Kapitel 9.1 das Verhalten einer Fahrzeugkolonne ohne den Einfluss sonstiger Verkehrsteilnehmer betrachtet wurde, rückt in diesem Kapitel die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern in den Mittelpunkt. Dabei wird an einigen Stellen auf die zu Beginn von Kapitel 9 eingeführten Begrifflichkeiten der Fahrzeuggruppen *Potentielle Kolonnenteilnehmer mit Kommunikationsmöglichkeit, Verkehrsteilnehmer mit Kommu-*

nikationsmöglichkeit und *Verkehrsteilnehmer ohne Kommunikationsmöglichkeit* zurückgegriffen.

9.2.1 Interaktion beim Überholen

Um die vorgesehene Kolonnengeschwindigkeit möglichst konstant einhalten zu können, sind langsamere Fahrzeuge zu überholen. Daher sind Handlungsstrategien zu entwickeln, die derartige Fahrmanöver mit einer Fahrzeugkolonne ermöglichen. In bisherigen Projekten zur autonomen Kolonnenfahrt (vgl. Kapitel 6.2) spielten Überholmanöver eine untergeordnete Rolle, da bisher lediglich Kolonnen mit Lkw-Führungsfahrzeugen untersucht wurden. Im Projekt SARTRE wird das Überholen anderer Fahrzeuge zwar vorgesehen, jedoch nicht weiter ausgeführt (vgl. Robinson et al., 2010). Nachfolgend sollen einige Randbedingungen definiert werden, ehe auf den möglichen Ablauf eines Überholvorgangs eingegangen wird.

In einem Gerichtsverfahren hat das Oberlandesgericht Hamm am 29.10.2008 entschieden (Aktenzeichen 4 Ss OWi 629/08), dass ein Überholvorgang bei gleichzeitiger unangemessener Behinderung des nachfolgenden Verkehrs maximal 45 Sekunden dauern darf. Für den Fall, dass ein Lkw einen anderen Lkw im Bereich der zulässigen Höchstgeschwindigkeit überholen möchte und sämtliche Sicherheitsabstände eingehalten werden, bedeutet dies, dass die Geschwindigkeitsdifferenz etwa 10 km/h betragen muss. Länger andauernde Überholmanöver sind dann erlaubt, wenn andere Verkehrsteilnehmer beispielsweise auf einen weiteren Fahrstreifen ausweichen können oder sehr geringes Verkehrsaufkommen herrscht. Den Richtern sei durchaus bewusst, dass mit dieser Faustregel den unterschiedlichen Interessen der Verkehrsteilnehmer und der Vielzahl denkbarer Verkehrssituationen (z. B. Überholen mehrerer Lkw durch mehrere Lkw) nicht immer hinreichend Rechnung getragen werden könne. Ein Verstoß kann bei deutlicher Behinderung anderer Verkehrsteilnehmer bußgeldrechtlich geahndet werden. Dies ist bei der Auslegung eines Systems zur autonomen Kolonnenfahrt – speziell für Lkw- und gegebenenfalls Reisebus-geführte Kolonnen – zu berücksichtigen, da hier verstärkt eine Behinderung anderer Verkehrsteilnehmer möglich ist. Sofern eine Fahrzeugkolonne als eine Einheit betrachtet wird, ist bei einem Überholmanöver – in Abhängigkeit der Kolonnenlänge – von einem länger andauernden Überholmanöver auszugehen. Um die Anforderungen des Urteils in Bezug auf die Überholdauer und die Ausnahmeregelungen beachten zu können, muss die Kolonnenregelung neben der Geschwindigkeit des zu überholenden Fahrzeugs über Informationen zu Anzahl der Fahrstreifen sowie zum Verkehrsaufkommen verfügen. Um den Fahrer des Führungsfahrzeugs bei der Einleitung und Überwachung des Überholvorgangs zu unterstützen, werden die Sensordaten aus der Seitenraumüberwachung der Folgefahrzeuge verknüpft. Zudem bietet sich eine Überwachung des Verkehrsraums hinter dem letzten Folgefahrzeug an, die als eine Art „Kolonnenrückspiegel“ Anwendung finden kann.

Stellvertretend für alle Kolonnenüberholmanöver wird an dieser Stelle der Überholvorgang einer Pkw-Kolonne betrachtet. Im Ausgangszustand und ohne Beeinflussung anderer Verkehrsteilnehmer fährt die Kolonne mit der vorgesehenen Geschwindigkeit auf dem rechten Fahrstreifen, siehe Abbildung 57.

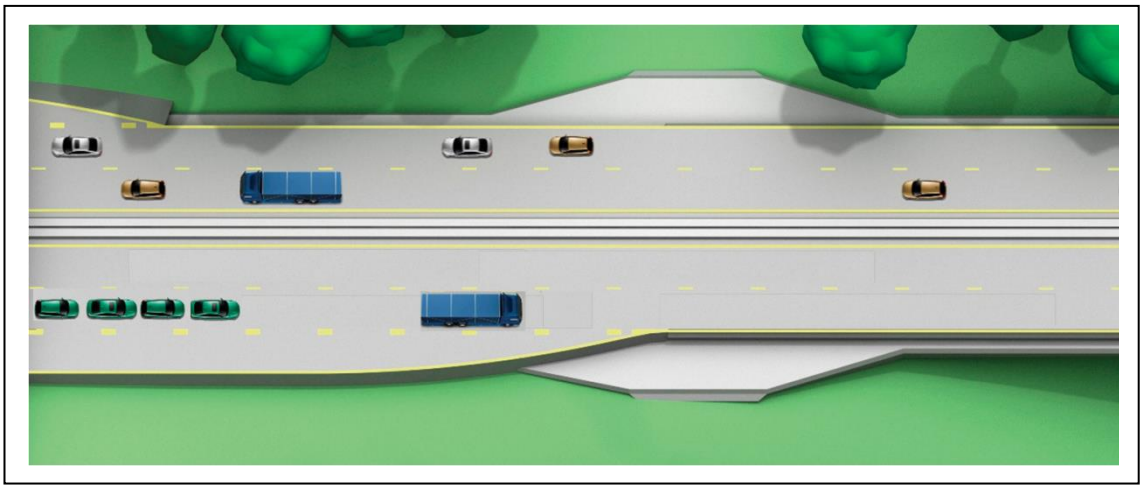


Abbildung 57: Ausgangszustand vor Überholmanöver. (In Anlehnung an Ricardo, 2009)

Sobald die Umfeldsensorik des Führungsfahrzeugs ein langsameres vorausfahrendes Fahrzeug detektiert, wird dessen Geschwindigkeit ermittelt und die Überholdauer sowie die Überholstrecke berechnet. Mithilfe der Sensordaten aus den Folgefahrzeugen lässt sich der Verkehrsraum neben der Fahrzeugkolonne als auch das Verkehrsaufkommen hinter der Fahrzeugkolonne beobachten. Der Fahrer des Führungsfahrzeugs erhält diese Informationen in aufbereiteter Form in seinem Anzeigedisplay, so dass er – sofern ihm freie Fahrt signalisiert wird und er dies überprüft hat – über die Einleitung eines Fahrstreifenwechsels entscheiden kann.

Beim Fahrstreifenwechsel einer Fahrzeugkolonne sind zwei unterschiedliche Vorgehensweisen denkbar. Entweder folgen alle Kolonnenteilnehmer in Echtzeit dem Fahrstreifenwechsel des Führungsfahrzeugs oder sie wechseln zeitlich versetzt auf den linken Fahrstreifen, siehe Abbildung 58. Die Zeitdauer, die der linke Fahrstreifen durch den Überholvorgang in Summe belegt ist, ändert sich dadurch nicht.

Die zweitgenannte Variante weist jedoch besonders bei langen Fahrzeugkolonnen den Nachteil auf, dass sich von hinten nähernde Fahrzeuge während des Fahrstreifenwechselvorgangs neben der Kolonne platzieren könnten, wodurch der geplante Fahrstreifenwechsel einiger Folgefahrzeuge verhindert wird. Bei Fahrzeugen mit Kommunikationsmöglichkeit können die Fahrer auf die Fahrzeugkolonne aufmerksam gemacht werden, so dass sie sich kooperativ verhalten können. Aufgrund der geringen Fahrzeugfolgeabstände ist die Kolonne zwar auch für Fahrer sonstiger Fahrzeuge ohne Kommunikationsmöglichkeit erkennbar, aber es ist nicht davon auszugehen, dass jeder Fahrer darauf reagiert und hinter dem letzten Folgefahrzeug zurückbleibt. Um Kollisio-

nen zu vermeiden, ist das Fahrzeugumfeld der Folgefahrzeuge ständig durch die Sensorik zu überwachen und bei Bedarf der Fahrstreifenwechsel zu unterbinden. Durch die Regelung des ACC und des Spurhalteassistenten bleiben die Fahrzeuge weiterhin sicher geführt. Da in der betrachteten Systemkonfiguration jedoch kein vollautomatisiertes Fahren inklusive vollautomatisierter Fahrstreifenwechsel möglich ist, muss die Kolonnenteilnahme in dieser Situation beendet und die Fahrzeugsteuerung an den Fahrer zurückgegeben werden.

Abbildung 58: Vergleich zweier Vorgehensweisen beim Fahrstreifenwechsel. (In Anlehnung an Ricardo, 2009)

Um derartige Komplikationen zu vermeiden, ist deshalb eine Handlungsstrategie für einen Fahrstreifenwechsel analog zu Abbildung 58 (oben) zu empfehlen, da von hinten heranfahrende Fahrzeuge so keine Auswirkungen auf die Fahrzeugkolonne haben.

Beim Fahrstreifenwechsel nach rechts am Ende des Überholvorgangs spielt es dagegen in Bezug auf die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern keine Rolle, ob die Fahrzeuge direkt nach dem Überholvorgang zeitlich versetzt den Fahrstreifen wechseln, oder ob die gesamte Kolonne auf dem linken Fahrstreifen verbleibt, bis sie als Einheit nach rechts wechseln kann. Ein zeitgleicher Fahrstreifenwechsel aller Kolonnenteilnehmer ist vermutlich technisch einfacher umzusetzen. In beiden Fällen wird der

linke Fahrstreifen jedoch erst dann freigegeben, wenn das letzte Folgefahrzeug den Überholvorgang abgeschlossen hat. Für den Fahrstreifenwechsel nach rechts ist der Fahrer des Führungsfahrzeugs ebenfalls durch die Umfelderfassung und die Informationen aus dem Kolonnenregler zu unterstützen. Ihm muss beispielsweise angezeigt werden, ob die Lücke groß genug ist, um die Fahrzeugkolonne darin zu platzieren, oder ob es besser ist, weitere Fahrzeuge zu überholen.

Sofern es die Kolonnenzusammensetzung und die zulässige Höchstgeschwindigkeit erlaubt, ist für die Dauer des Überholvorgangs eine geringfügige Erhöhung der Kolonnengeschwindigkeit vorstellbar, um das Fahrmanöver zügig abzuschließen. Die Verantwortung, nachfolgende Verkehrsteilnehmer nicht unangemessen lange zu behindern, obliegt dem Fahrer des Führungsfahrzeugs, der die Entscheidung zur Durchführung eines Überholmanövers trifft. Schwankungen in der Fahrgeschwindigkeit des zu überholenden Fahrzeugs können ebenfalls für einen unnötig langen Überholvorgang sorgen. Daher können zu überholende Fahrzeuge mit Kommunikationsmöglichkeit auf den Überholvorgang hingewiesen werden, damit diese die Differenzgeschwindigkeit bis zum Abschluss des Überholvorgangs nicht verkleinern.

9.2.2 Interaktion bei Hindernissen auf der Fahrbahn

In diesem Kapitel soll der Umgang einer Fahrzeugkolonne mit Hindernissen auf der Fahrbahn, in Form von Gegenständen oder liegengebliebenen Fahrzeugen, aufgezeigt werden.

Liegengebliebene Fahrzeuge können dabei selbst mittels Positionsbestimmung (siehe Kapitel 4.2.2.1) via C2CC ihren Standort mitteilen. Falls das Fahrzeug zudem weitere Sensorik zur Umfelderfassung besitzt, ist auch eine Information zum betroffenen Fahrstreifen generierbar. Alternativ, falls das liegengebliebene Fahrzeug über keine Möglichkeit zur Kommunikationsteilnahme verfügt, sind Erkennung und Positionsermittlung durch die Sensorik und Umfeldüberwachung anderer Fahrzeuge möglich. Selbiges gilt, wenn sich Gegenstände auf der Fahrbahn befinden. Die heranfahrende Fahrzeugkolonne kann so – falls nötig – frühzeitig den Fahrstreifen wechseln und gegebenenfalls die Fahrgeschwindigkeit reduzieren. Sofern ein liegengebliebenes Fahrzeug oder ein Gegenstand auf dem eigenen Fahrstreifen erstmals vom Führungsfahrzeug der Kolonne detektiert wird und somit keine vorherige Meldung erfolgte, kann ein kurzfristiger Fahrstreifenwechsel für die gesamte Kolonne unter Umständen nicht mehr möglich sein. Der Kolonnenregler gibt daraufhin ein Zielbremsmanöver vor, sodass die Kolonne vor dem Hindernis zum Stehen kommt. Dabei sind, wenn es die Entfernung zum Hindernis zulässt, die Abstände zwischen den Fahrzeugen zu vergrößern, um eine mögliche Übernahme der Fahrzeugsteuerung für den Fahrer zu erleichtern. Ist ein anschließendes Umfahren des Hindernisses nicht für die gesamte Kolonne möglich, so ist die Kolonne vom Fahrer des Führungsfahrzeugs aufzulösen und die Steuerung der Folge-

fahrzeuge an deren Fahrer zu übergeben. Sollte das System erkennen, dass ein rechtzeitiges Anhalten vor einem Hindernis nicht mehr möglich ist, wird eine Gefahrenbremsung eingeleitet. Der Fahrer des Führungsfahrzeugs wird wahrscheinlich – wie auch die Fahrer der Folgefahrzeuge – durch die Gefahrenbremsung automatisch auf die Notsituation aufmerksam gemacht, so dass er nach eigenem Ermessen die Quer- und Längsführung des Fahrzeugs übernehmen kann. Da Notsituationen häufig sehr schnell und auch undefiniert ablaufen können, ist zur Unfalls- oder Schadensvermeidung unbedingt eine maximale Geschwindigkeitsreduktion anzustreben. Um jedoch eine Abstimmung der Kolonnenteilnehmer bezüglich ihrer Längsregelung auch während der Bremsung zu ermöglichen, bleiben sie bis zum Ende des Fahrmanövers miteinander verbunden. Es ist zudem denkbar, dass Fahrzeuge selbständig ein Ausweichmanöver durchführen, sofern der Fahrer noch nicht reagiert hat und eine Kollision unausweichlich erscheint. Sollte dabei die Einheit der Kolonne getrennt werden, so ist die Kolonnenfahrt für die zurückgebliebenen Fahrzeuge beendet.

9.2.3 Interaktion an Ein- und Ausfahrten

Ein reibungsloser Ablauf der Kolonnenfahrt in Verbindung mit der Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern an Ein- und Ausfahrten stellt eine große Herausforderung dar. Je nach Länge der Fahrzeugkolonne kann diese beispielsweise fast den gesamten Einfädelbereich blockieren und somit einfahrende Fahrzeuge zum Abbremsen zwingen. Bei Einsatz eines kooperativen Systems müssten Geschwindigkeitsdifferenzen ausgeglichen werden, falls ein Lkw einfädeln möchte, der sich neben einer Pkw-Kolonne befindet. Eine weitere Herausforderung ist insbesondere die Interaktion mit Fahrzeugen, die über keine Kommunikationsmöglichkeit verfügen. Ohne geeignete regelungstechnische Maßnahmen kann es daher im Bereich von Ein- und Ausfahrten zu kritischen Fahrmanövern kommen, die es – auch aus Gründen der allgemeinen Akzeptanz für Fahrzeugkolonnen – zu vermeiden gilt.

Nach Paragraph 18 Absatz 3 der StVO hat der Verkehr auf der durchgehenden Fahrbahn Vorfahrt, so dass aus rechtlicher Sicht kein Bedarf besteht, eine kooperative Kolonnensteuerung zu entwerfen. Da es bisher jedoch lediglich Einzelfahrzeuge und keine Fahrzeugkolonnen gibt, ist davon auszugehen, dass mit der Einführung von Fahrzeugkolonnen Gesetzesanpassungen stattfinden werden. Daher sollen in diesem Kapitel verschiedene Möglichkeiten angesprochen werden, wie die Interaktion zwischen einer Fahrzeugkolonnen und Einzelfahrzeugen an Autobahneinfahrten ablaufen kann.

Ein Fahrstreifenwechsel der gesamten Fahrzeugkolonne nach links lehnt sich an das heute oft praktizierte Vorgehen von Einzelfahrzeugen an, um Fahrzeugen auf dem Einfädelstreifen den Wechsel auf die durchgehende Fahrbahn zu ermöglichen. Inwiefern ein solcher Fahrstreifenwechsel mit der gesamten Kolonne möglich ist, hängt hauptsächlich vom Verkehrsaufkommen hinter und neben der Kolonne als auch in entschei-

dendem Maße von der Kolonnenlänge ab. Die Wahrscheinlichkeit, einen Fahrstreifenwechsel durchführen zu können steigt, wenn Fahrzeuge mit Kommunikationsmöglichkeit bereits vorab einen Hinweis bereitstellen, wann sie sich auf dem Einfädelstreifen befinden werden. Der Kolonnenregler kann diese Meldungen auswerten und dem Fahrer des Führungsfahrzeugs daraufhin wahlweise eine Geschwindigkeitsanpassung oder – falls möglich – einen Fahrstreifenwechsel vorschlagen.

Um auch Fahrzeuge ohne Kommunikationsmöglichkeit zu erfassen, könnte auf Detektoren in der Zufahrt des Einfädelstreifens zurückgegriffen werden, die ihre Daten via C2IC an die heranfahrende Kolonne senden. Alternativ können mit Lichtsignalanlagen gesteuerte Zuflussdosierungsanlagen zum Einsatz kommen, die die Einfahrt auf die Autobahn sperren, sobald sich eine Fahrzeugkolonne nähert. Eine flächendeckende Umsetzung von Infrastrukturmaßnahmen an tausenden europäischen Autobahneinfahrten darf jedoch angezweifelt werden. Sobald sich ein Fahrzeug ohne Kommunikationsmöglichkeit auf dem Einfädelstreifen befindet, kann es auch von der Umfeldsensorik des Führungsfahrzeugs erfasst werden. Jedoch ist dann nur eine kurzfristige und gegebenenfalls nicht optimale Anpassung der Kolonne möglich. Eine Vergrößerung der Fahrzeugfolgeabstände beziehungsweise eine kurzfristige Unterteilung der Fahrzeugkolonne in Teilkolonnen bereits vor Erreichen des Einfädelstreifens könnte hier für Abhilfe sorgen, birgt jedoch die Gefahr, dass sich andere Verkehrsteilnehmer in diese Lücken einordnen. Daher ist eine intelligente Regelung zu entwerfen, so dass die Lücke für die einfahrenden Fahrzeuge nur im Bereich des Einfädelstreifens in ausreichender Größe vorhanden ist.

Sofern kein Fahrstreifenwechsel nach links möglich ist, sind weitere Strategien denkbar, um Fahrzeugen auf dem Einfädelstreifen einen Wechsel auf die durchgehende Fahrbahn zu ermöglichen. Beispielsweise kann der Kolonnenregler im Bereich von Autobahneinfahrten – sofern die Kolonne eine gewisse Länge übersteigt – an einer oder mehreren Stellen eine Vergrößerung des Fahrzeugfolgeabstand vorgeben. Gleichzeitig können Fahrzeuge auf dem Einfädelstreifen durch neue Assistenzsysteme wie dem „Einfädelassistenten“ unterstützt werden, siehe auch Kapitel 2.2.3.3. Dieser detektiert einerseits vorhandene Lücken auf dem Zielfahrstreifen und betrachtet andererseits den längsdynamischen Aktionsraum des Fahrzeugs. Durch Verknüpfung der ermittelten Informationen kann eine Erreichbarkeitsanalyse für verschiedene Lücken durchgeführt werden. Daraufhin werden dem Fahrer längsdynamische Fahrempfehlungen mitgeteilt oder die längsdynamische Regelung zum Erreichen der vorgesehenen Lücke erfolgt automatisiert durch das Fahrzeug (vgl. Knake-Langhorst et al., 2013).

Ein derartiges System könnte in Verbindung mit der Kolonnenfahrt und der C2CC helfen, Fahrzeuge gegebenenfalls auch in kleinen Lücken zu positionieren und so die Akzeptanz von Fahrzeugkolonnen zu erhöhen. Es ist jedoch zu klären, wie sich eine Fahrzeugkolonne verhält, wenn sich Nicht-Kolonnenteilnehmer zwischen Folgefahrzeugen befinden sollten. Im SARTRE-Projekt ist für diesen Fall vorgesehen, dass die Kolonne dies kurzzeitig tolerieren kann, anschließend jedoch eine Abkopplung der Fol-

gefahrzeuge hinter dem Nicht-Kolonnenteilnehmer erfolgt (vgl. Robinson et al., 2010). Sofern der Nicht-Kolonnenteilnehmer jedoch in die Kolonnensteuerung aufgenommen werden möchte, müssen nur noch die elektronische Kopplung und die Übergabe der Fahrzeugsteuerung an das System erfolgen. Es ist jedoch sicherzustellen, dass sich der potentielle neue Kolonnenteilnehmer bereits in der richtigen Lücke befindet, sodass die Vorgabe „Lkw vor Reisebus vor Pkw“ stets eingehalten wird.

Im Bereich von Autobahnausfahrten stellt die Erarbeitung von Handlungsstrategien eine geringere Herausforderung dar, da im Vorfeld mehrere Hinweisschilder auf die Ausfahrt aufmerksam machen und sich Verkehrsteilnehmer somit rechtzeitig auf dem rechten Fahrstreifen einordnen können. Eine kurzfristige und zuvor nicht geplante Anpassung der Fahrzeugkolonne ist daher nicht notwendig. Sonstige Verkehrsteilnehmer können sich in ausreichendem Abstand vor der Ausfahrt auf dem rechten Fahrstreifen einordnen oder sich dazu entscheiden, die Kolonne noch vor der Ausfahrt zu überholen. Sollten sie sich dabei in der Geschwindigkeit oder der Kolonnenlänge verschätzen, beispielsweise weil die Kolonnenlänge nicht einsehbar ist, kann es vorkommen, dass ein Erreichen des Ausfädelstreifens nicht mehr möglich ist. Daher kann es für die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern hilfreich sein, wenn generell im Bereich von Ausfahrten kurzfristig die Folgeabstände zwischen den Kolonnenteilnehmern vergrößert werden. Je nach Länge der Kolonne muss der Kolonnenregler vorgeben, ob dies an einer oder mehreren Stellen der Fall sein soll. Dabei ist es vermutlich am sinnvollsten, kurzfristig kleine Teilkolonnen zu bilden anstatt die Abstände zwischen allen Fahrzeugen zu vergrößern.

© VuV 2013

10 Auswirkungen der autonomen Kolonnenfahrt

Die Einführung der autonomen Kolonnenfahrt beeinflusst verschiedenste – mit dem Verkehrsgeschehen in Zusammenhang stehende – Bereiche. Mit einer Fahrzeugkolonne als neue Variante eines Verkehrsteilnehmers ergeben sich aufgrund ihrer Größe beispielsweise Auswirkungen auf den Verkehrsfluss. Des Weiteren sind z.B. durch Windschatteneffekte und Fahrerassistenzsysteme wie ACC Energieeinsparungen möglich. Daneben können Fahrerassistenzsysteme auch helfen, die Verkehrssicherheit zu steigern, was wiederum positive Auswirkungen auf die Volkswirtschaft hat. Diese und weitere Effekte sollen im Rahmen dieses Kapitels weiter ausgeführt werden.

10.1 Einfluss von Fahrzeugkolonnen auf den Verkehrsfluss

Fahrzeugkolonnen auf Autobahnen können aufgrund ihrer Länge und der geringen Fahrzeugfolgeabstände das Verkehrsgeschehen beeinflussen. Inwiefern sich dabei positive oder negative Effekte einstellen, soll im Rahmen dieses Kapitels untersucht werden. Dabei wird einerseits der Verkehrsfluss auf der freien Strecke und andererseits der Verkehrsfluss im Bereich von Autobahneinfahrten unter jeweiliger Variation des Kolonnenanteils analysiert. Die Simulation des Verkehrsflusses und die Auswertung der Ergebnisse erfolgen mit der Simulations-Software VISSIM (Version 5.30-10, PTV Planung Transport Verkehr AG, Karlsruhe). Auf die verschiedenen Randbedingungen der Simulationen wird in den nachfolgenden Unterkapiteln 10.1.2 und 10.1.3 eingegangen. Weitere Informationen hierzu sind in den aufgeführten Anlagen einzusehen. Vorab sollen jedoch mit einer theoretischen Analyse die Kapazitätssteigerungen durch den Einsatz von Fahrzeugkolonnen untersucht werden. Aufgrund des geringen Anteils von Bussen auf Autobahnen, beschränken sich die nachfolgenden Untersuchungen auf Pkw und Lkw sowie auf homogene Pkw- und Lkw-Kolonnen[16].

10.1.1 Theoretische Kapazitätsanalyse

Die Belastbarkeit eines Straßenquerschnitts ist begrenzt. Stau kann folglich nicht nur durch vorübergehende Ereignisse wie Unfälle oder Baustellen, sondern auch durch Überlastung entstehen. Die maximale Kapazität eines Fahrstreifens beträgt etwa 1600 bis 2000 Fz/h. Diese Kapazität ist in der Regel in einem Geschwindigkeitsbereich zwischen 60 und 90 km/h zu erreichen. Bei welchen Werten das Kapazitätsmaximum erreicht wird, hängt unter anderem von der Streckencharakteristik, dem Fahrerkollektiv

[16] Der Anteil des Busverkehrs liegt auf deutschen Autobahnen in einer Größenordnung <1 % des Gesamtverkehrs (Quelle: Bundesweite Verkehrszählung 2010, online verfügbar unter http://www.svz-bw.de/fileadmin/verkehrszaehlung/svz/rpt-95-svz-2010-bab.pdf, heruntergeladen am 18.06.2013).

oder von Witterungseinflüssen ab (vgl. Zumkeller, 2004). Gemäß dem Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS, 2005) liegt die erreichbare Kapazität für eine Richtungsfahrbahn mit zwei Fahrstreifen bei einem Schwerverkehrsanteil von 10 % und einer Geschwindigkeitsbegrenzung von 80 km/h bei 3900 Fahrzeugen/Stunde.

Für die theoretische Kapazitätsanalyse zur Untersuchung des Einflusses von Fahrzeugkolonnen soll die Berechnung nicht über den Zeitbedarfswert erfolgen[17]. Stattdessen soll eine differenziertere Betrachtung durchgeführt werden, die sowohl unterschiedliche Fahrzeuglängen als auch unterschiedliche Kolonnenlängen und die jeweiligen Fahrzeugfolgeabstände erfasst. Mit diesem Vorgehen wird zunächst die Verkehrsdichte *k* bestimmt und schließlich unter Annahme einer konstanten Geschwindigkeit *v* (80 km/h)[18] mithilfe bekannter Zusammenhänge aus der Kontinuumstheorie die Verkehrsstärke *q* berechnet (vgl. Zumkeller, 2004):

$$q = k * v$$

mit

q Verkehrsstärke [Fz/h]

k Verkehrsdichte [Fz/km]

v Geschwindigkeit [km/h].

Um das Vorgehen und die zum Teil angenommenen Werte für Abstände und Fahrzeugabmessungen zu verifizieren, wird zunächst eine Berechnung mit Pkw- und Lkw-Einzelfahrzeugen vorgenommen und anschließend das Ergebnis mit den Werten aus dem Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) verglichen. Die Berechnung ergibt für einen 2-streifigen Autobahnabschnitt eine Kapazität von 3818 Fz/h bei einem angenommen Schwerverkehrsanteil von 15 % – das HBS sieht hierfür eine Kapazität von 3800 Fz/h vor. Die Abweichung der beiden Werte beträgt etwa 0,5 %, so dass das beschriebene Vorgehen für weitere theoretische Betrachtungen herangezogen werden kann. Die Eingangsgrößen der Berechnung sowie Erläuterungen hierzu sind in Anlage 3 einzusehen. Die Kapazität von 3818 Fz/h bildet die Grundlage für die Darstellung der Kapazitätsänderungen infolge der Kolonnennutzung. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass dieser Wert lediglich einen theoretischen Vergleichswert darstellt. Untersuchungen auf 2-streifigen Autobahnabschnitten haben gezeigt, dass vereinzelt Verkehrsstärken zwischen 4000 und 4500 Fz/h erreichbar sind. Dies ist jedoch nur mit einem häufigen Unterschreiten des geforderten Sicherheitsabstands

[17] Bei einem Zeitbedarfswert von 1,8 bis 2 s pro Fahrzeug ist eine Kapazität 1800 bis 2000 Einzel-Fz/h erreichbar, beziehungsweise 3600 bis 4000 Einzel-Fz/h auf einem 2-streifigen Streckenabschnitt.

[18] Bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h für Lkw und Pkw wird gemäß HBS (2005) die höchste Verkehrsstärke erzielt. Diese homogene Geschwindigkeit für Lkw und Pkw ist beispielsweise durch temporäre Tempolimits bei Verkehrsbeeinflussungsanlagen zu erreichen.

möglich. Zudem befindet man sich bei derart hohen Verkehrsstärken deutlich im Übergangsgebiet zwischen einem stabilen und einem instabilen Verkehrsfluss (vgl. Wu, 2000). Durch die Kolonnennutzung soll der stabile Bereich erweitert werden.

Für die Auswertung wird der Schwerverkehrsanteil von 15 % stets beibehalten und der Anteil der Fahrzeugkolonnen am Gesamtverkehr variiert. Die Kolonnenlänge für Lkw- und Pkw-Kolonnen wird in der Berechnung jeweils durch eine mittlere Kolonnenlänge repräsentiert. Hierfür werden die Kolonnen unterschiedlicher Länge mit relativen Häufigkeiten versehen, so dass kurze Kolonnen im Vergleich zu langen Kolonnen tendenziell häufiger auftreten (siehe auch Anlage 3). Für die Untersuchung werden drei verschiedene Szenarien definiert:

- *Szenario 1:* nur Lkw-Kolonnen mit verschiedenen Anwendungsraten
- *Szenario 2:* Pkw- und Lkw-Kolonnen mit jeweils gleichen Anwendungsraten
- *Szenario 3:* Pkw- und Lkw-Kolonnen mit unterschiedlichen Anwendungsraten.

Die Anwendungsrate wird im Folgenden durch eine Zahlenkombination dargestellt. Die erste Zahl gibt die Anwendungsrate bei Pkw (Anteil Pkw-Kolonnen) an, die zweite Zahl die Anwendungsrate bei Lkw (Anteil Lkw-Kolonnen)[19].

In Abbildung 59 sind die berechneten Ergebnisse für Szenario 1 dargestellt. Ausgehend von einem Zustand ohne Fahrzeugkolonnen ist die Kapazität eines 2-streifigen Autobahnabschnitts durch den Einsatz von Lkw-Kolonnen theoretisch um bis zu 11,2 % zu steigern.

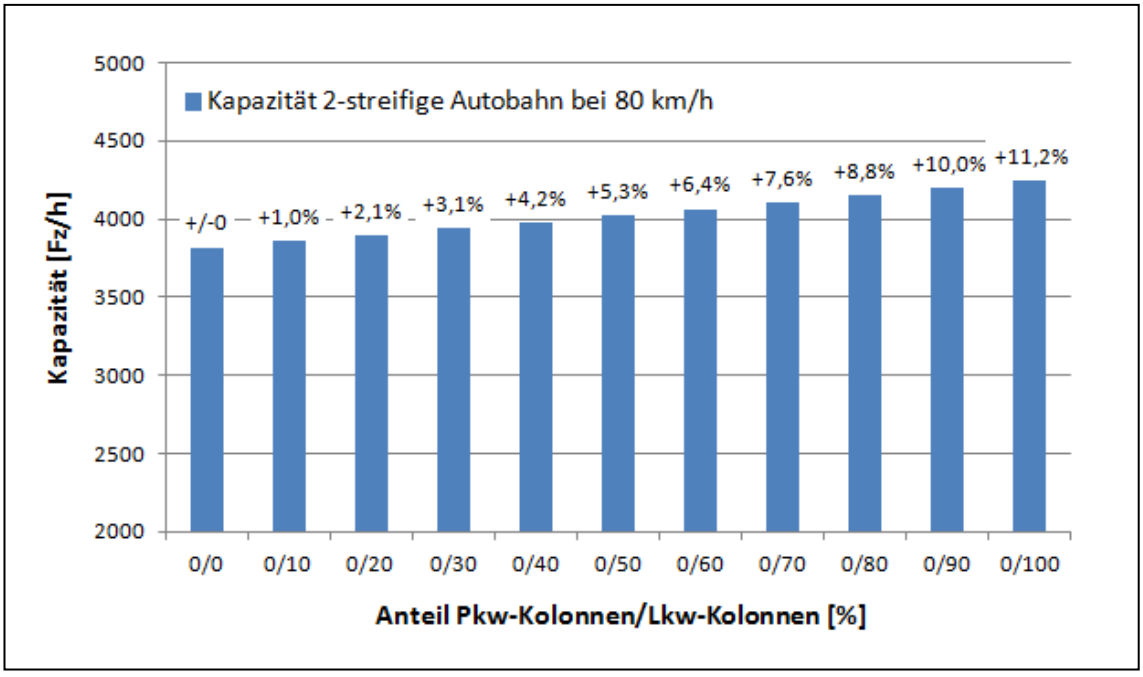


Abbildung 59: Kapazitätsänderung durch Lkw-Kolonnen (Szenario 1).

[19] Beispiel: „25/75“ bedeutet, dass 25% aller Pkw und 75% aller Lkw in Kolonnen fahren.

Bei einer realistischeren Annahme, bei der etwa 30 bis 50 % aller Lkw die Kolonnenteilnahme nutzen, so sind Kapazitätssteigerungen von 3 bis 5 % möglich. Trotz des im Vergleich zu Pkw geringen Lkw-Anteils sind positive Auswirkungen auf die Kapazität eines Straßenquerschnitts vorhanden und bei einer entsprechenden Ausstattungsquote auch messbar.

Deutlich größere Kapazitätssteigerungen werden jedoch möglich, wenn gleichzeitig auch Pkw die Möglichkeit zur Kolonnenteilnahme nutzen können. Sie stellen einerseits einen größeren Anteil am Gesamtverkehr dar und anderseits ist es ihnen aufgrund der geringeren Fahrzeugabmessungen erlaubt, mehr Kolonnenteilnehmer in einer Kolonne zu vereinen. Bei einer Pkw-Kolonne mit sechs Fahrzeugen verringert sich der benötigte Platzbedarf inklusive der Folgeabstände verglichen mit dem Platzbedarf von sechs Einzelfahrzeugen um etwa 130 m. Abbildung 60 zeigt die theoretisch möglichen Kapazitätssteigerungen beim Einsatz von Pkw- und Lkw-Kolonnen unter der Annahme, dass jeweils ein prozentual gleich großer Anteil die Möglichkeit zur Kolonnenteilnahme nutzt (Szenario 2). Sofern sich 20 % aller Verkehrsteilnehmer zur Kolonnenteilnahme bereit erklären, sind Kapazitätssteigerungen in der Größenordnung von 12 % möglich. Ein Gedankenspiel mit einer vollständigen Nutzung des Systems durch alle Verkehrsteilnehmer zeigt eine maximale Kapazität von über 8000 Fahrzeugen/Stunde auf einem 2-streifigen Autobahnabschnitt. Ein derartiger Kolonnenanteil ist jedoch in der Praxis nicht realistisch. Weiteres theoretisches Potential ergibt sich dann, wenn auch den Führungsfahrzeugen – im Rahmen eines hochautomatisierten Fahrmodus – ein Unterschreiten des gesetzlich vorgeschriebenen Abstands zum vorausfahrenden Fahrzeug erlaubt wird.

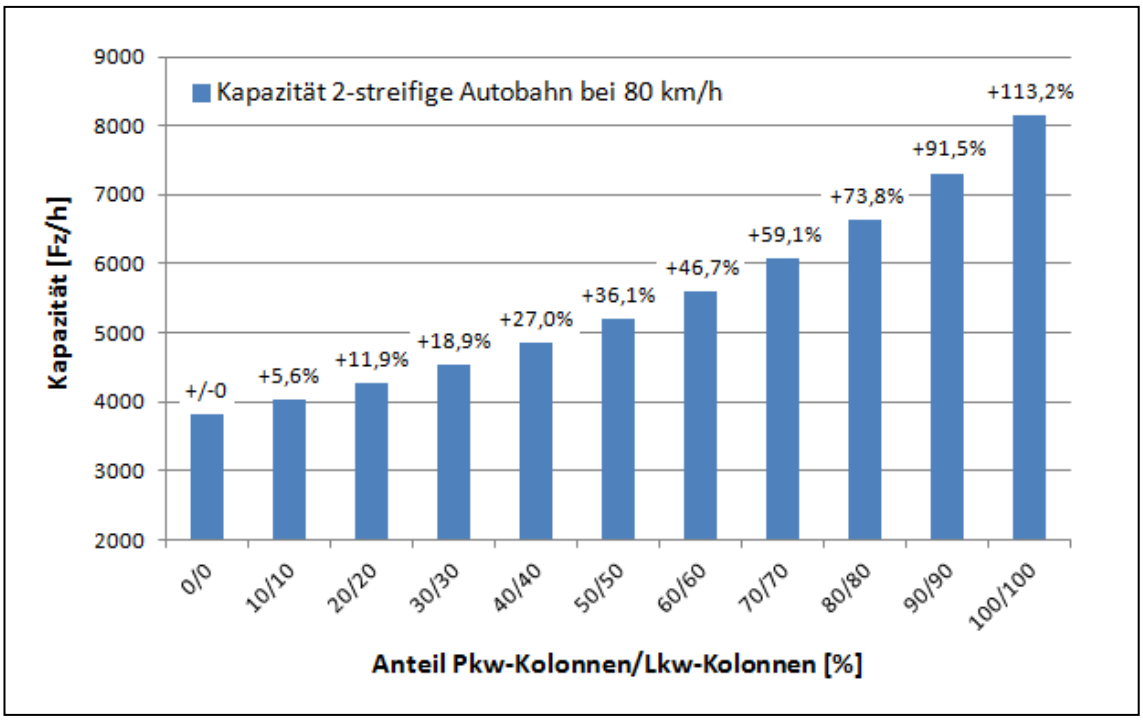


Abbildung 60: Kapazitätsänderung durch Pkw- und Lkw-Kolonnen (Szenario 2).

Die nachfolgende Abbildung 61 zeigt die Kapazitätssteigerungen für verschiedene Anteile von Pkw- und Lkw-Kolonnen (Szenario 3). Dabei wird davon ausgegangen, dass Lkw prozentual doppelt so häufig die Möglichkeit zur Kolonnenteilnahme nutzen. Die in diesem Szenario dargestellten Fälle können dann eintreten, wenn die Nutzung des Systems zur Kolonnenfahrt beispielsweise für Lkw attraktiver ist und sich das System dort schneller verbreitet. Auch die Annahme, dass das System zur Kolonnenfahrt zunächst für Lkw und erst zu einem späteren Zeitpunkt für Pkw verfügbar ist, kann zu den in Abbildung 61 dargestellten Verteilungen führen. Bei einer Nutzung des Systems durch 15 % aller Pkw und 30 % aller Lkw sind Kapazitätssteigerungen von etwa 10 % möglich.

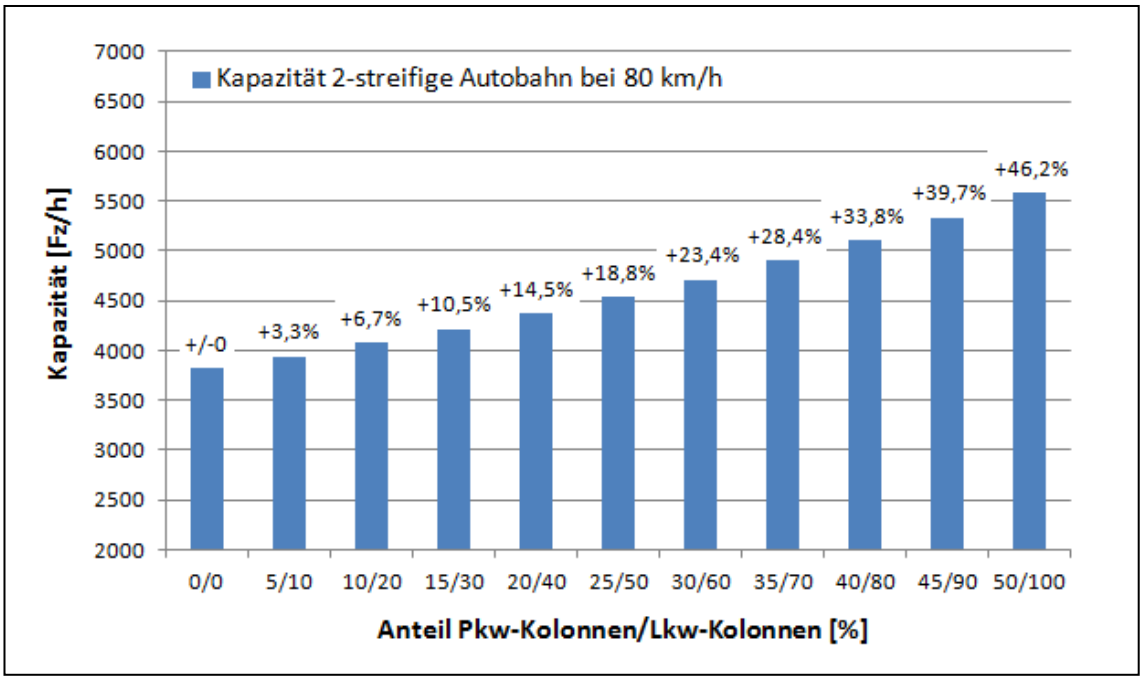


Abbildung 61: Kapazitätsänderungen durch verschiedene Anteile von Pkw- und Lkw-Kolonnen (Szenario 3).

10.1.2 Verkehrsfluss auf der freien Strecke

10.1.2.1 Simulationsbeschreibung

Die Untersuchung der Auswirkungen infolge der autonomen Kolonnenfahrt auf freier Strecke – d.h. ohne Ein- und Ausfahrten – erfolgt auf einem 25 km langen Autobahnabschnitt mit zwei Fahrstreifen. Für die Simulation werden die vier Fahrzeugtypen *Pkw, Pkw-Kolonne, Lkw* und *Lkw-Kolonne* sowie ihre Wunschgeschwindigkeiten definiert. Sowohl für die Lkw- als auch für die Pkw-Kolonnen werden Kolonnen verschiedener Länge erstellt und mit unterschiedlichen relativen Häufigkeiten versehen, so dass kurze

Kolonnen im Vergleich zu langen Kolonnen tendenziell häufiger auftreten. Der Lkw-Anteil orientiert sich mit 15% an Werten, die in Deutschland im Rahmen von Verkehrszählungen auf Autobahnen ermittelt wurden. Die Verkehrsstärke ist mit 2500 Fahrzeugen pro Stunde so gewählt, dass Fahrzeuge häufig miteinander beziehungsweise mit Fahrzeugkolonnen in Interaktion treten, der Verkehrsfluss aber dennoch nicht zusammenbricht. Größere Verkehrsstärken werden für bestimmte Fälle bzw. bei der Kapazitätsanalyse in Abschnitt 10.1.1 und 10.1.2.3 betrachtet.

Für die Durchführung der Simulationen müssen weitere verschiedene Randbedingungen für den betrachteten Autobahnabschnitt festgelegt werden. Die Fahrzeugtypen und deren Wunschgeschwindigkeitsverteilungen sind in Anlage 4 zusammengefasst. Für die Standardfahrzeuge wird das Fahrverhaltensmodell nach Wiedemann verwendet. Für die Kolonnen wird ein verfügbares ACC-System vorausgesetzt, was durch eine entsprechende Anpassung des Fahrverhaltensmodells umgesetzt wird, siehe Anlage 5.

Die Einführung bisher verfügbarer Sicherheits- oder Fahrerassistenzsysteme hat gezeigt, dass eine vollständige Marktdurchdringung Jahre oder gar Jahrzehnte dauern kann. Da es sich bei diesen Systemen häufig um teure Entwicklungen handelt, werden sie normalerweise zunächst als Sonderausstattung in Fahrzeugen der Oberklasse angeboten, ehe sie im weiteren Verlauf auch in kleineren Fahrzeugklassen angeboten werden (sogenannter Top-Down-Prozess). Eine vollständige Marktdurchdringung wird zusätzlich durch ältere, noch in Betrieb befindliche Fahrzeuge verzögert[20]. Ähnlich kann es sich bei einem System für die autonome Kolonnenfahrt verhalten, wenngleich hier durch den ab 2013 bzw. 2015 verpflichtenden Einsatz von ACC- und LDW-Systemen in bestimmten Lkw erste Grundlagen für eine schnellere Marktdurchdringung geschaffen werden. Mit Einführung eines solchen Systems wächst die Marktverbreitung somit nur langsam und die Einflüsse auf den Verkehrsfluss sind gegebenenfalls zunächst kaum erkennbar. In der Simulation soll dieser Umstand durch die Definition verschiedener Fahrzeugzusammensetzungen berücksichtigt werden. Der sogenannte *Standardfall* stellt dabei die Referenz dar und bildet den heutigen Zustand ab. In weiteren Simulationen werden zunächst Szenarien untersucht, bei dem lediglich Lkw-Kolonnen in wachsender Häufigkeit eingesetzt werden. Daran schließen sich Simulationen an, die zusätzlich auch den Einsatz von Pkw-Kolonnen in unterschiedlicher Häufigkeit vorsehen. Untersucht werden diese Simulationsfälle jeweils mit und ohne Lkw-Überholverbot. Für jeden definierten Fall werden jeweils vier Simulationsläufe durchgeführt, um auch Schwankungen besser berücksichtigen zu können. Jeder Durchlauf mit unterschiedlichen Start-Zufallszahlen weist eine Simulationsdauer von 4800 s auf, wobei in den ersten 3600 s die festgelegte Verkehrsstärke vorliegt und die verbleibenden

[20] Durchschnittliches Fahrzeugalter zum 01. Januar 2013 in Deutschland: 8,7 Jahre (Quelle: KBA Kraftfahrbundesamt Deutschland, online verfügbar unter http://www.kba.de/cln_032/nn_125398/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Kurzbericht/2013__b__pdf,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/2013_b_pdf.pdf, heruntergeladen am 16.06.2013)

1200 s so gewählt sind, dass alle eingesetzten Fahrzeuge die Strecke innerhalb der Simulationszeit zurücklegen können.

10.1.2.2 Ergebnisse für die freie Strecke

Zum Vergleich des Standardfalls mit den Fällen verschiedener Anwendungsraten der Kolonnenfahrten werden drei verschiedene verkehrliche Kenngrößen betrachtet. Als weitere Kenngrößen zur Bewertung der Gleichmäßigkeit der Fahrweisen werden der Effektivwert der Beschleunigung a_{rms} berücksichtigt sowie die Anzahl durchgeführter Bremsmanöver ermittelt:

- *Reisezeit*[21]*:* benötigte Zeit, um den definierten Streckenabschnitt zu durchfahren
- *Reisegeschwindigkeit:* zurückgelegte Strecke in Bezug auf die Reisezeit
- *Verlustzeit:* Zeitverlust gegenüber der theoretisch unbeeinflussten Fahrt
- *Bremsmanöveranzahl*[22]*:* Anzahl der Bremsmanöver, bei denen eine Fahrzeuglängsbeschleunigung kleiner -2 m/s^2 erreicht wird
- *Beschleunigungseffektivwert*[22]*:* quadratischer Mittelwert der Fahrzeuglängsbeschleunigung mit Zeitmittelung über die Reisezeit.

Reisezeit und Reisegeschwindigkeit haben die gleiche Aussagefähigkeit, da in allen Fällen eine identische Strecke vorliegt. Idealerweise benötigt ein Pkw für eine Strecke von 25 km bei einer Geschwindigkeit von 130 km/h ca. 690 s (11 Minuten und 30 Sekunden), während ein Lkw bei 80 km/h für die gleiche Strecke 1125 s (18 Minuten und 45 Sekunden) benötigt. Die Anzahl der Bremsvorgänge stellt ein Maß für die Gleichmäßigkeit des Verkehrsflusses dar – je weniger Bremsmanöver durchgeführt werden müssen, desto konstanter kann die jeweilige Wunschgeschwindigkeit gehalten werden. Die Gleichmäßigkeit des Verkehrsflusses kann auch durch den Effektivwert der Fahrzeuglängsbeschleunigung verdeutlicht werden, der sich wie folgt berechnet:

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T a^2(t)dt}$$

mit

a_{rms} Effektiverwert der Längsbeschleunigung in [m/s^2]

a(t) Beschleunigung zum Zeitpunkt t in [m/s^2]

T Reisezeit in [s].

[21] Entspricht eigentlich der „Fahrzeit“, in der verwendeten Simulations-Software VISSIM wird jedoch der Begriff „Reisezeit“ verwendet – diese Nomenklatur wird entsprechend übernommen.

[22] Der Effektivwert der Beschleunigung und die Anzahl der Bremsvorgänge werden aufgrund des aufwändigen Auswerteverfahrens für fünf ausgewählte Fälle betrachtet.

Je geringer dieser ist, desto weniger Beschleunigungsvorgänge werden durchgeführt. Dies hat direkte Auswirkungen auf den Energiebedarf der Fahrzeuge, siehe auch Kapitel 10.2.2, beeinflusst aber auch den Verkehrsfluss, wie im Folgenden gezeigt wird.

Analog zum Vorgehen bei der theoretischen Kapazitätsanalyse in Abschnitt 10.1.1 werden die drei dort definierten Szenarien betrachtet, jeweils ohne und mit Überholverbot für Lkw. Die Anwendungsrate wird ebenfalls durch die in Abschnitt 10.1.1 eingeführte Zahlenkombination dargestellt. Wie bereits erwähnt besteht die Verkehrszusammensetzung für alle betrachteten Fälle insgesamt zu 85 % aus Pkw und zu 15 % aus Lkw. Die im Folgenden aufgeführten Werte sind jeweils die gewichteten arithmetischen Mittelwerte aller vier Simulationsdurchläufe. Die ermittelten Werte für Reise- und Verlustzeiten sowie deren prozentuale Änderung gegenüber dem entsprechenden Standardfall sind auch für alle durchgeführten Fälle in Anlage 6 zu finden. Tatsächlich dürften die ermittelten Werte generell höher ausfallen, da jeweils alle Fahrzeuge betrachtet wurden – also auch die Fahrzeuge, die zu Beginn der Simulation eingesetzt wurden und damit eine freie Strecke vorgefunden haben. Prozentuale Angaben beziehen sich jeweils auf den entsprechenden Standardfall 0%/0%. Zur Verdeutlichung der Auswirkungen wird in den Diagrammen auch der Idealfall 100%/100% mit dargestellt.

Bei *Szenario 1 ohne Überholverbot* bei 2500 Fz/h kann die mittlere Pkw-Reisegeschwindigkeit mit steigendem Anteil an Lkw-Kolonnen geringfügig gesteigert werden (bis maximal 6 % bei 0%/100%). Entsprechend kann die mittlere Verlustzeit von Pkw von 227 s auf 172 s reduziert werden. Die Verbesserungen bei der mittleren Reisegeschwindigkeit bzw. der Verlustzeiten von Lkw bzw. Lkw-Kolonnen sind vernachlässigbar, vor allem bedingt durch die Geschwindigkeitsbeschränkung auf 80 km/h. Wie zu erwarten, hat ein Überholverbot für Lkw positive Auswirkungen auf die Reisegeschwindigkeit bzw. die Verlustzeiten von Pkw. Es können jedoch keine Veränderungen mit steigendem Anteil von Lkw-Kolonnen festgestellt werden. Bedingt durch das Überholverbot für Lkw verschlechtern sich deren Reise- bzw. Verlustzeit nominell. Die Änderungen sind jedoch vernachlässigbar und können auch auf statistische Schwankungen zurückgeführt werden.

Werden nun, wie in *Szenario 2* festgelegt, gleiche Kolonnenanteile betrachtet, so ergeben sich deutlichere Änderungen als bei Szenario 1, da der Kolonnenanteil insgesamt ebenfalls steigt. In diesem Szenario wird auch der – wenn auch unwahrscheinliche – Fall betrachtet, dass alle Fahrzeuge in Kolonnen fahren (100%/100%). Bei 2500 Fz/h ohne Lkw-Überholverbot steigt die mittlere Pkw-Reisegeschwindigkeit bei einer Anwendungsrate von 25%/25% bereits von 93,1 km/h um ca. 5 % auf 97,4 km/h an. Im Idealfall (100%/100%) ist bei Pkw eine mittlere Reisegeschwindigkeit von 112 km/h ermittelt worden. Wie bei Szenario 1 ergibt sich bei Lkw aufgrund der Geschwindigkeitsbeschränkung auf 80 km/h nur eine geringfügige Veränderung der mittleren Reisegeschwindigkeit. Lediglich bei 100%/100% Anwendungsrate steigt sie merklich um 3 % auf 84,7 km/h an. Entsprechend der höheren Reisegeschwindigkeiten ergeben sich auch geringere Verlustzeiten.

In Abbildung 62 ist die ermittelte Summenhäufigkeit der Verlustzeiten von Pkw für verschiedene Anwendungsraten nach Szenario 2 dargestellt. Mit steigender Anwendungsrate ist eine deutliche Verringerung der Verlustzeiten festzustellen.

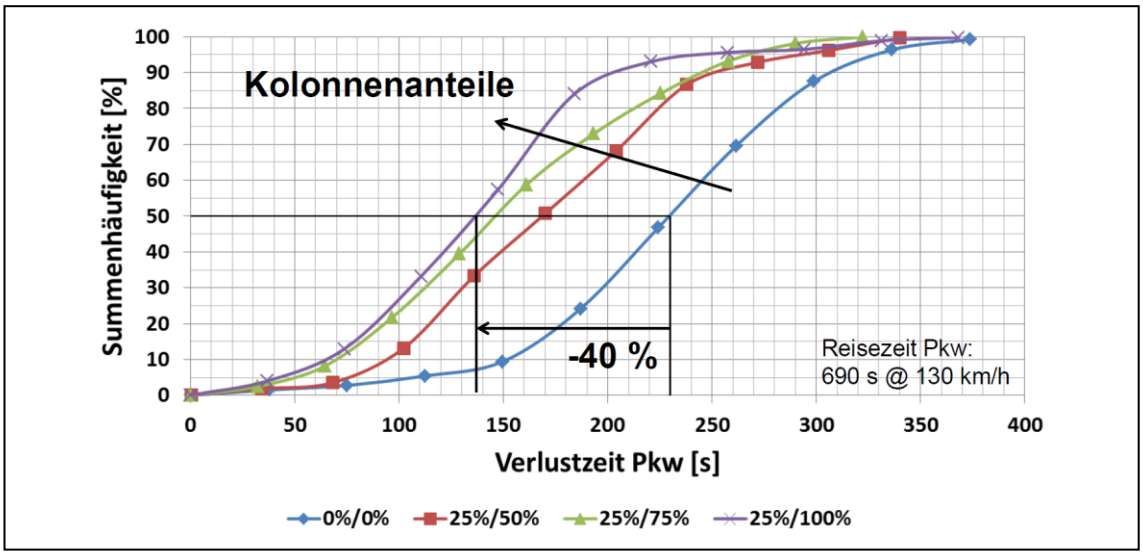


Abbildung 62: Summenhäufigkeit der Verlustzeiten für Pkw für verschiedene Kolonnenanwendungsraten nach Szenario 2 (ohne Lkw-Überholverbot).

Die gleichen Aussagen gelten auch entsprechend für Szenario 2 mit Lkw-Überholverbot, jedoch sind hier die Verbesserungen für Pkw noch ausgeprägter, Abbildung 63. Auffällig bei der Betrachtung der Verlustzeiten ist, dass bei einer Anwendungsrate von 25%/25% die Verlustzeit für Pkw-Kolonnen nur um 1% reduziert werden kann. Dies kann dadurch erklärt werden, dass die Überholmöglichkeiten für Pkw-Kolonnen aufgrund der restlichen 75 % des Pkw-Aufkommens noch stark eingeschränkt ist – mit steigenden Kolonnenanteilen wird unter anderem die Zahl der Überholmöglichkeiten jedoch wieder größer.

Um die Größenverhältnisse bei den Verlustzeiten besser einordnen zu können, bietet sich ein Vergleich mit den idealen Reisezeiten an. Bei Pkw beispielsweise beträgt die mittlere Verlustzeit im Standardfall mit Lkw-Überholverbot ca. 137 s. Dies entspricht einer Verlängerung der idealen Reisezeit um +20 %.

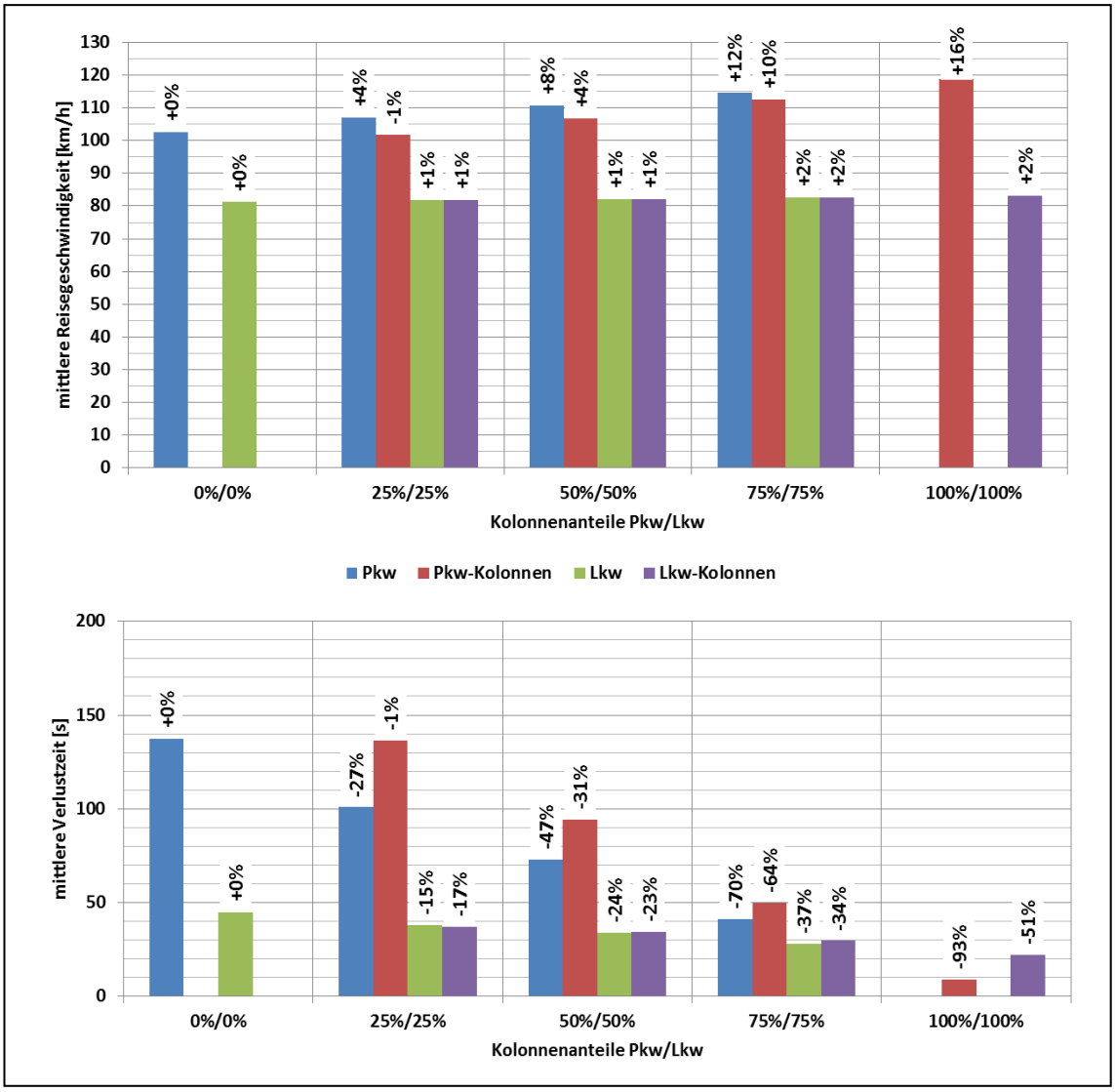


Abbildung 63: Mittlere Reisegeschwindigkeit und Verlustzeit für Pkw bei verschiedenen Kolonnenanwendungsraten nach Szenario 2 (mit Lkw-Überholverbot).

Werden nun für ausgewählte Simulationsfälle bei bestehendem Überholverbot für Lkw die Anzahl der Bremsvorgänge und der Beschleunigungseffektivwert betrachtet, so ist sowohl bei Pkw als auch bei Lkw eine nachvollziehbare Korrelation zwischen den beiden Kenngrößen vorhanden – je größer der Beschleunigungseffektivwert ist, desto größer ist auch die Anzahl der Bremsvorgänge. Bei Pkw (Abbildung 64 oben) zeigt sich, dass der Kolonnenanteil 0%/50% keine direkten Auswirkungen auf die Anzahl der Bremsmanöver hat. Sobald jedoch auch 25% der Pkw in Kolonne fahren, sinkt die Anzahl der Bremsmanöver bereits merklich ab – sowohl für die frei fahrenden Pkw als auch für die Pkw-Kolonnen. Der Rückgang kann durch die Verwendung von ACC sowie durch die geringere Interaktionswahrscheinlichkeit zwischen den Fahrzeugen erklärt werden. Dass mit sinkender Anzahl an Bremsvorgängen eine Steigerung der mittleren Pkw-Reisegeschwindigkeit einhergeht zeigt, dass durch die Bildung von Kolonnen – wenn auch erst bei entsprechenden Anwendungsraten – der Verkehrsfluss

merklich verbessert wird. Bei Lkw sind ähnliche Ergebnisse zu erkennen, wenn auch die Auswirkungen durch das Überholverbot und die geringeren Geschwindigkeitsunterschiede kleiner ausfallen als bei Pkw, Abbildung 64 unten.

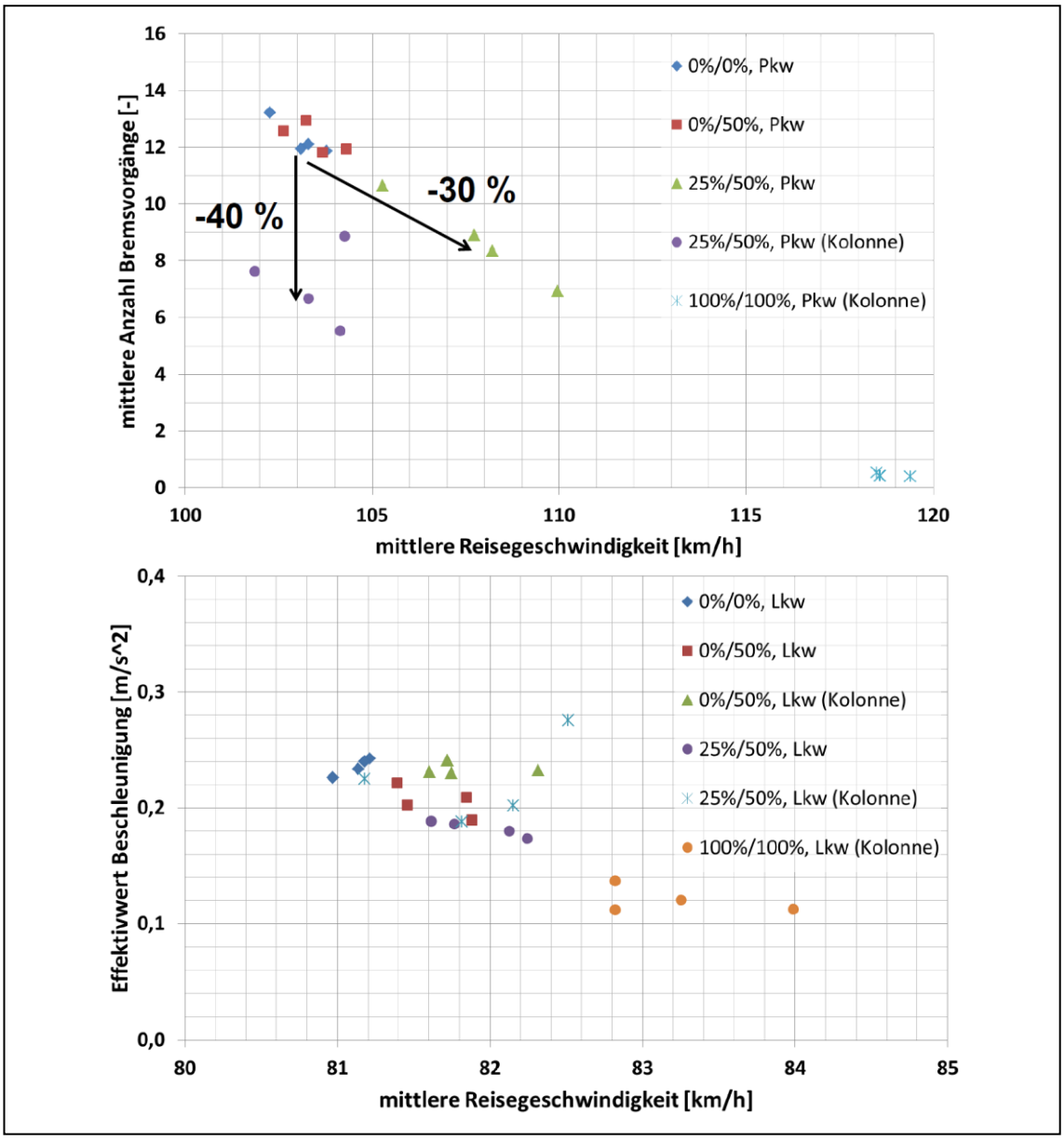


Abbildung 64: Mittlere Anzahl der Bremsmanöver für Pkw (oben) sowie Mittelwert des Beschleunigungseffektivwerts für Lkw (unten) bei bestehendem Lkw-Überholverbot und verschiedenen Kolonnenanteilen.

Wie bei Pkw verbessert sich die Kenngröße mit steigendem Kolonnenanteil. Die Simulationsergebnisse können in gewissem Rahmen durch die Ergebnisse der von Benmimoun et al. (2013) ausgewerteten Feldstudie zur Auswirkung der Abstandsregelung verifiziert werden. In der Feldstudie konnte durch die Verwendung von ACC und FCW ein Rückgang bei der Zahl und Frequenz starker Bremsvorgänge, bei gleichzeitig gesteigerter Durchschnittsgeschwindigkeit, ermittelt werden. Die hier nicht aufgeführten

Ergebnisse zum Beschleunigungseffektivwert von Pkw bzw. zur Anzahl der Bremsmanöver von Lkw sind in Anlage 7 zu finden.

Steigende Verkehrsstärken wurden aufgrund der zahlreichen Kombinationsmöglichkeiten nur bei ausgewählten Fällen exemplarisch betrachtet, Abbildung 65.

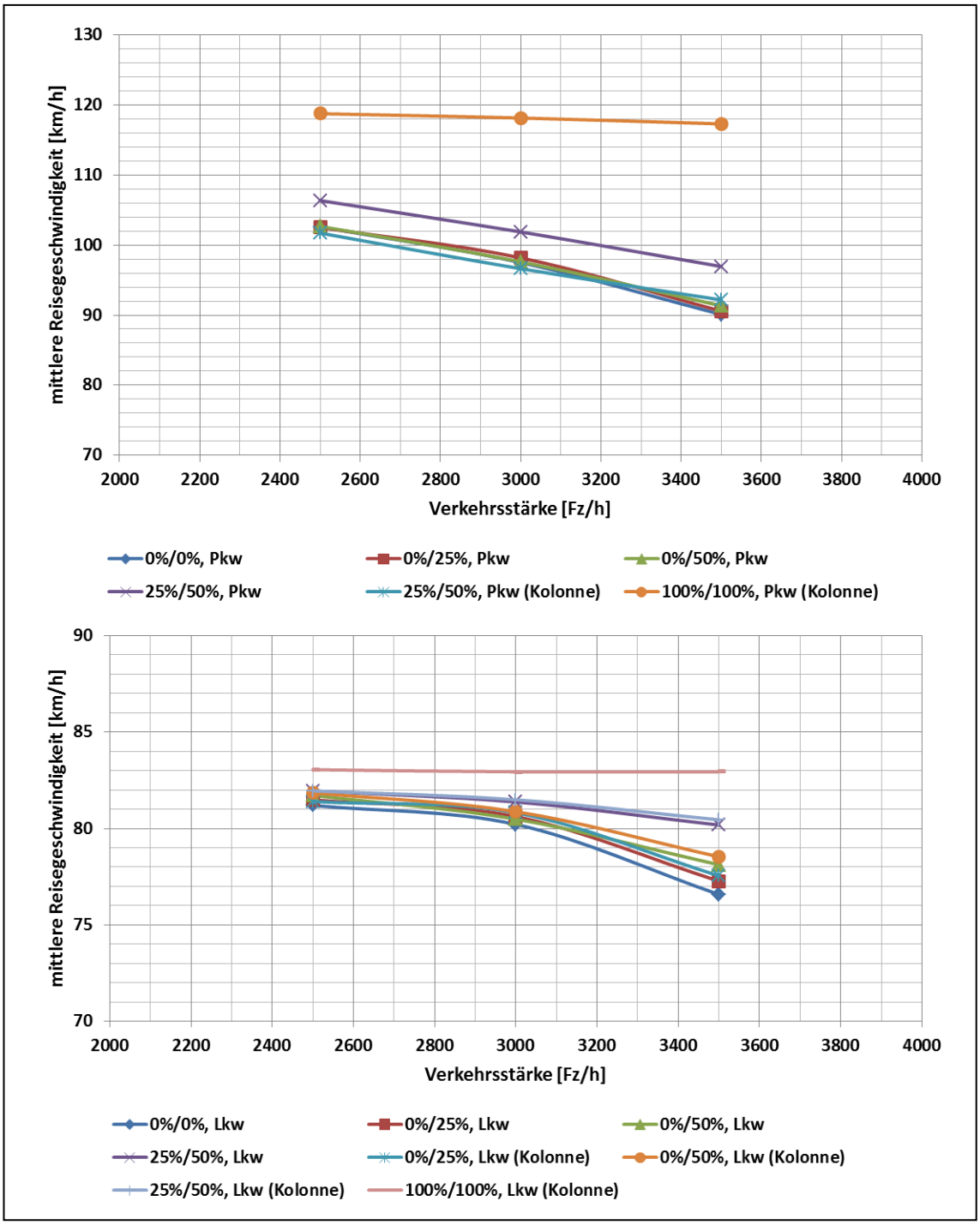


Abbildung 65: Mittlere Reisegeschwindigkeiten für Pkw (oben) und Lkw (unten) für steigende Verkehrsstärken und verschiedene Kolonnenanteile (mit Lkw-Überholverbot).

In allen Fällen, abgesehen vom Idealfall 100%/100%, sinkt die mittlere Pkw-Reisegeschwindigkeit erkennbar ab, Abbildung 65 oben. Für moderate Erhöhungen der Verkehrsstärke ergeben sich für die betrachteten Fälle ähnliche Verbesserungspotentiale wie bisher beschrieben. Bei Lkw (Abbildung 65 unten) verringert sich bei bestehendem Überholverbot bei einer Erhöhung der Verkehrsstärken von 2500 auf 3000 Fz/h die mittlere Reisegeschwindigkeit nur geringfügig, fällt bei einer weiteren Erhöhung auf 3500 Fz/h jedoch deutlich ab. Sobald jedoch auch Pkw in Kolonnen fahren (25%/50%), kann die mittlere Reisegeschwindigkeit auch bei höheren Verkehrsstärken besser gehalten werden. Die Verschlechterungen mit höheren Verkehrsstärken sind allgemein auf die größere Anzahl an Interaktionen zwischen den Fahrzeugen zurückzuführen.

Zur Betrachtung der Auswirkung von Kolonnen auf den Verkehrsfluss kann also festgehalten werden, dass hohe Lkw-Kolonnenanteile nur bei Strecken ohne Lkw-Überholverbot Verbesserungen für Pkw bewirken. Deutliche Auswirkungen auf den Verkehrsfluss ergeben sich erst mit steigendem Anteil an Pkw-Kolonnen, da hierdurch mehr Fahrzeuge beeinflusst werden können bzw. die Zahl der Interaktionen zwischen den Fahrzeugen bei konstanter Verkehrsstärke zurückgeht.

10.1.2.3 Kapazitätsanalyse

Die theoretische Kapazitätsanalyse in Kapitel 10.1.1 zeigt bei vollständiger Nutzung des Systems zur autonomen Kolonnenfahrt durch alle Verkehrsteilnehmer ein sehr großes Potential zur Kapazitätssteigerung (siehe Abbildung 60 auf Seite 172). Inwieweit eine theoretische Kapazität von über 8000 Fz/h auf einem 2-streifigen Streckenabschnitt erreichbar ist, soll durch eine Simulation verifiziert werden.

Hierfür wird auf einen 25 km langen Autobahnabschnitt mit zwei Fahrstreifen zurückgegriffen sowie die Fahrzeugzusammensetzung entsprechend gewählt, dass alle Fahrzeuge Teilnehmer einer Kolonne sind. Für alle Fahrzeuge wird ein ACC-System vorausgesetzt, was durch eine entsprechende Anpassung des Fahrverhaltensmodells umgesetzt wird, siehe Anlage 5. Um auch den Einfluss höherer Geschwindigkeiten bei Pkw-Kolonnen erfassen zu können, wird zunächst ein Geschwindigkeitsbereich von 110 km/h bis 130 km/h für Pkw-Kolonnen und ein Geschwindigkeitsbereich von 80 bis 90 km/h für Lkw-Kolonnen gewählt. Anschließend wird die Geschwindigkeit der Pkw-Kolonnen ebenfalls auf 80 bis 90 km/h reduziert, um die Ergebnisse der Simulation mit der theoretischen Berechnung aus Kapitel 10.1.1 vergleichen zu können.

Für die Ermittlung der maximal möglichen Kapazität des Straßenquerschnitts wird die Soll-Verkehrsstärke in der Simulation schrittweise gesteigert und anschließend die tatsächlich erreichte Verkehrsstärke ausgewertet. Die Ergebnisse der Simulation sind in Abbildung 66 dargestellt. Auf der x-Achse sind die untersuchten Soll-Verkehrsstärken in einer Schrittweite von 500 Fz/h aufgetragen. Auf der y-Achse werden ebenfalls Ver-

kehrsstärken in Fz/h aufgetragen, dabei wird jedoch zwischen folgenden Verkehrsstärken unterschieden:

- *Blaue Balken:* Soll-Verkehrsstärke; diese Verkehrsstärke entspricht der Eingangsgröße (siehe x-Achse) und dient als Vergleichswert.
- *Rote Balken:* erreichte Verkehrsstärke in der Simulation (inhomogene Geschwindigkeitsverteilung
- *Grüne Balken:* erreichte Verkehrsstärke in der Simulation (homogene Geschwindigkeitsverteilung: Geschwindigkeitsbereich von 80 km/h bis 90 km/h für Pkw- und Lkw-Kolonnen).

Die Differenzen zwischen Soll-Verkehrsstärke und erreichter Verkehrsstärke entstehen dadurch, dass bei hohen Verkehrsstärken nicht alle Fahrzeuge am Streckenanfang eingesetzt werden können. Die Fahrzeuge, die sich jedoch auf der Strecke befinden, passieren diese, ohne dass dabei ein Stau entsteht beziehungsweise die Reisegeschwindigkeit unter 80 km/h fällt. Verantwortlich hierfür sind die gewählten Fahrverhaltensparameter für Fahrzeuge mit ACC.

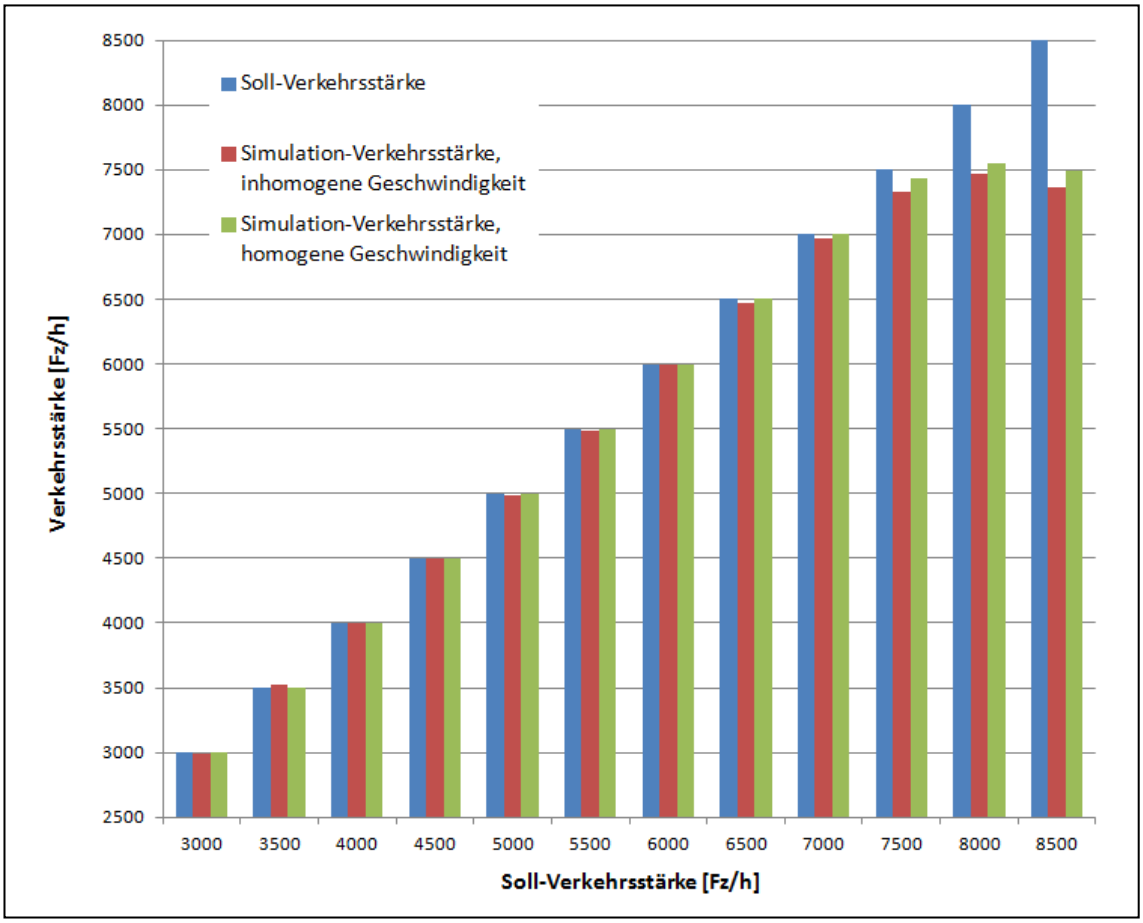


Abbildung 66: Ermittlung des Kapazitätsmaximums bei vollständiger Kolonnennutzung auf einer 2-streifigen Autobahn.

Bei einer inhomogenen Geschwindigkeitsverteilung (rote Balken) ergibt sich eine maximal mögliche Verkehrsstärke von 7463 Fz/h, wobei sich hier die mittlere Pkw-Geschwindigkeit von 118 km/h bei einer Soll-Verkehrsstärke von 3000 Fz/h auf 103 km/h bei einer Soll-Verkehrsstärke von 8000 Fz/h reduziert. Bei einer homogenen Geschwindigkeitsverteilung (grüne Balken) ergibt sich u.a. aufgrund der geringeren Fahrzeugfolgeabstände innerhalb einer Fahrzeugkolonne eine Steigerung der maximalen Verkehrsstärke auf 7550 Fz/h. Die mittlere Reisegeschwindigkeit von Pkw und Lkw liegt in dieser Situation bei 80 km/h.

Im Vergleich zur theoretisch berechneten maximalen Kapazität von 8138 Fz/h ermittelt die Simulation eine etwa 8 % geringere Kapazität. Die Abweichung ist darauf zurückzuführen, dass in der theoretischen Betrachtung keine Geschwindigkeitsschwankungen und kein Fahrverhaltensmodell, das u.a. den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug regelt, berücksichtigt werden. Des Weiteren führt das stochastische Einsetzen der Fahrzeugkolonnen in der Simulation zu einer Abweichung, da hier verfügbarer Verkehrsraum nicht optimal genutzt wird.

Ausgehend von 3800 Fz/h nach HBS (2005) beziehungsweise 3818 Fz/h nach den durchgeführten Berechnungen (Kapitel 10.1.1) ermittelt die Simulation eine Kapazitätssteigerung bei vollständiger Kolonnennutzung durch alle Verkehrsteilnehmer in einer Größenordnung von 98 %. Als Vergleich ergab die theoretische Kapazitätsanalyse in Kapitel 10.1.1 eine Kapazitätssteigerung in einer Größenordnung von 113 %.

10.1.3 Verkehrsfluss im Bereich von Autobahneinfahrten

10.1.3.1 Simulationsrandbedingungen

Die Untersuchung der Auswirkungen infolge der autonomen Kolonnenfahrt auf den Verkehrsfluss an Autobahneinfahrten erfolgt auf einem kurzen Autobahnabschnitt mit zwei Fahrstreifen auf der Hauptfahrbahn und einem 200 m langen Einfädelstreifen. Analog zu Kapitel 10.1.2 werden für die durchgehende Hauptfahrbahn die vier Fahrzeugtypen *Pkw, Pkw-Kolonne, Lkw* und *Lkw-Kolonne* sowie ihre Wunschgeschwindigkeiten definiert, siehe auch Anlage 4. Auf dem Einfädelstreifen und dessen Zufahrt sind lediglich Pkw und Lkw als einzelne Fahrzeuge gestattet. Für Fahrzeuge in der Zufahrt zum Einfädelstreifen gilt eine Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h. Mit Beginn des Einfädelstreifens dürfen die Fahrzeuge auf ihre Wunschgeschwindigkeit beschleunigen und auf den rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn wechseln. Die Parameter für einfahrende Lkw und Pkw sind in Bezug auf das Beschleunigungs- und das Spurwechselverhalten angepasst, da davon ausgegangen wird, dass die Fahrer dieser Fahrzeuge das Beschleunigungspotential ihres Fahrzeugs besser ausnutzen und tendenziell kleinere Lücken beim Spurwechsel nutzen. Die Parameter hierzu sind in Anlage 5 einzu-

sehen. Auf der Hauptfahrbahn sollen sich Einzelfahrzeuge und auch Fahrzeugkolonnen kooperativ verhalten und wenn möglich, auf den linken Fahrstreifen wechseln, um einfahrenden Fahrzeugen den Fahrstreifenwechsel auf die Hauptfahrbahn zu erleichtern. Für die Auswertung werden in der Simulation verschiedene Fahrzeugzusammensetzungen berücksichtigt. Dabei werden analog zu den vorangegangenen Untersuchungen in Kapitel 10 die Szenarien 1 bis 3 analysiert. Im Rahmen dieses Kapitels werden die Simulationsfälle ohne ein Lkw-Überholverbot betrachtet, um kooperative Spurwechsel zu ermöglichen. Mit jedem definierten Fall werden jeweils vier einstündige Simulationsläufe durchgeführt, um zufällige Schwankungen besser berücksichtigen zu können.

Die Verkehrsstärke auf der Hauptfahrbahn wird weiterhin mit 2500 Fz/h angenommen. Auf dem Einfädelstreifen sollte die Verkehrsstärke weder zu groß noch zu klein gewählt werden. Bei einer zu gering gewählten Verkehrsstärke sind zufällige Einflüsse überrepräsentiert oder es erfolgt kaum eine weitere Interaktion mit den Fahrzeugen auf dem Einfädelstreifen. Die Auswirkungen der Fahrzeugkolonnen auf der Hauptfahrbahn wären daher nur zum Teil sichtbar. Eine zu hohe Verkehrsstärke auf dem Einfädelstreifen führt dazu, dass der sofortige Fahrstreifenwechsel auf die Hauptfahrbahn oft nicht möglich ist. Dicht aufeinanderfolgende Fahrzeuge stauen sich daraufhin auf dem Einfädelstreifen. Auch dieser Fall ist zu vermeiden, da die Stausituation mit hoher Wahrscheinlichkeit bei vielen Versuchsfällen – unabhängig von der Kolonnenzusammensetzung – auftreten wird und somit Vergleiche nur schwer möglich sind. Daher wird zunächst die Verkehrsstärke für den Einfädelstreifen ermittelt, die im Zusammenhang mit 2500 Fz/h auf der Hauptfahrbahn zu keinen größeren Behinderungen auf dem Einfädelstreifen führt, aber gleichzeitig groß genug ist, um später eventuelle negative Auswirkungen durch Fahrzeugkolonnen erkennen zu können.

Diese Ermittlung erfolgt durch die Untersuchung des Standardfalls mit 2500 Fz/h auf der Hauptfahrbahn (85 % Pkw, 15 % Lkw, keine Kolonnen) und einer schrittweisen Erhöhung der Verkehrsstärke auf dem Einfädelstreifen (ebenfalls 85 % Pkw, 15 % Lkw). Die Auswertung, ob übermäßige Blockierungen des einfahrenden Verkehrs stattfinden, erfolgt über die Betrachtung der Reisezeiten zwischen der Zufahrt des Einfädelstreifens und einem weiteren Messpunkt nach dem Ende des Einfädelstreifens.

Abbildung 67 zeigt hierzu, dass mit steigenden Verkehrsstärken auf dem Einfädelstreifen die durchschnittlichen Reisezeiten der einbiegenden Fahrzeuge zunehmen. Besonders ab einer Verkehrsstärke von 650 Fz/h wird die benötigte Reisezeit im Zusammenhang mit 2500 Fz/h auf der Hauptfahrbahn deutlich negativ beeinflusst. Um einen gewissen Abstand zu dieser ermittelten Schwelle zu berücksichtigen, wird für die nachfolgenden Simulationen eine Verkehrsstärke von 500 Fz/h auf dem Einfädelstreifen festgelegt.

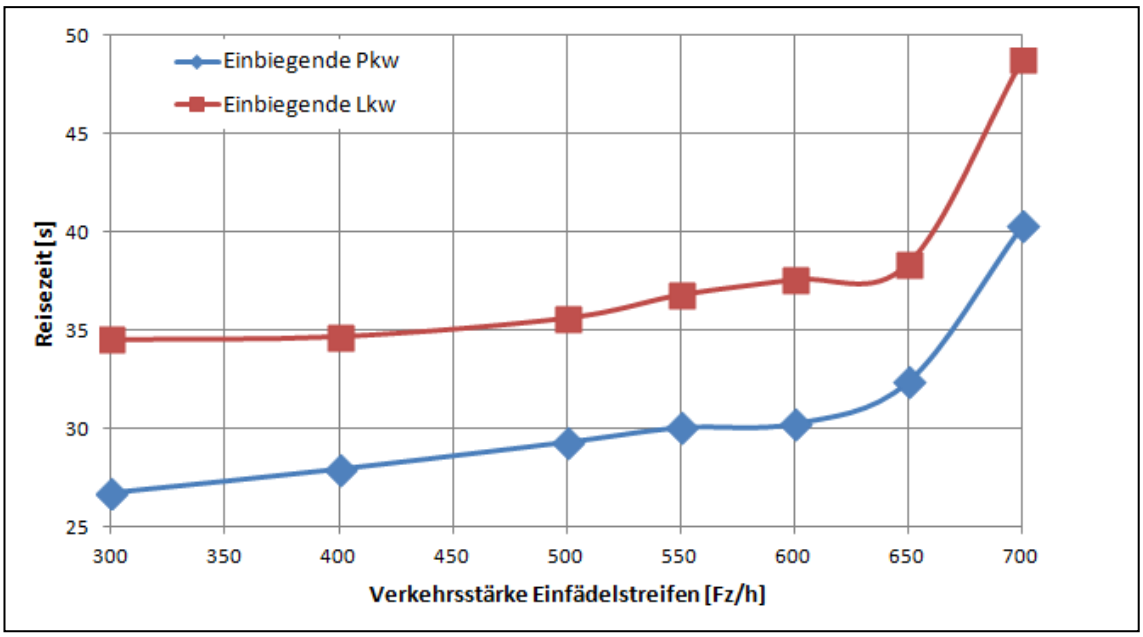


Abbildung 67: Reisezeit bei verschiedenen Verkehrsstärken auf dem Einfädelstreifen.

10.1.3.2 Ergebnisse für den Bereich von Autobahneinfahrten

Für die Untersuchung des Einflusses von Fahrzeugkolonnen im Bereich von Autobahneinfahrten sollen zwei wesentliche Kenngrößen betrachtet werden:

- *Reisezeit:* benötigte Zeit, um den definierten Streckenabschnitt zu durchfahren
- *Anteil blockierter Fahrzeuge:* Anteil der Fahrzeuge, die eine festgelegte Reisezeit überschreiten.

Die Reisezeit der einbiegenden Fahrzeuge wird zwischen einem Messquerschnitt zu Beginn des Einfädelstreifens und einem Messquerschnitt auf dem Autobahnabschnitt unmittelbar nach dem Einfahrbereich ermittelt. Um nicht nur die gemittelten Reisezeiten der einbiegenden Fahrzeuge betrachten zu können, wird zudem der Anteil der blockierten Fahrzeuge ausgewertet, da sich Auswirkungen in Bezug auf die Reisezeiten von Fahrzeugen, die frei einfahren können und Reisezeiten von blockierten Fahrzeugen gegenseitig aufheben können. Als ein blockiertes Fahrzeug wird ein Pkw bezeichnet, dessen Durchschnittsgeschwindigkeit innerhalb der Messstrecke unter 75 km/h liegt. Bei Lkw liegt der betrachtete Grenzwert bei 70 km/h[23]. Der Anteil der blockierten Fahrzeuge kann als Kriterium für die Bewertung der Akzeptanz von Fahrzeugkolonnen herangezogen werden, da eine hohe Blockadequote an Autobahneinfahrten das Ansehen von Fahrzeugkolonnen negativ beeinfluss kann.

[23] Diese Werte stellen den Mittelwert aus 60 km/h zu Beginn des Einfädelstreifens und der niedrigsten Wunschgeschwindigkeit des jeweiligen Fahrzeugtyps dar.

In der nachfolgenden Abbildung 68 sind die Ergebnisse für die Auswertung von Szenario 1 dargestellt. Dabei wird der Anteil der Lkw-Kolonnen auf der Hauptfahrbahn variiert, Pkw-Kolonnen sind nicht vorgesehen. Das obere Diagramm zeigt die mittleren Reisezeiten einfahrender Pkw und Lkw, während im unteren Diagramm der Anteil der blockierten Fahrzeuge dargestellt ist.

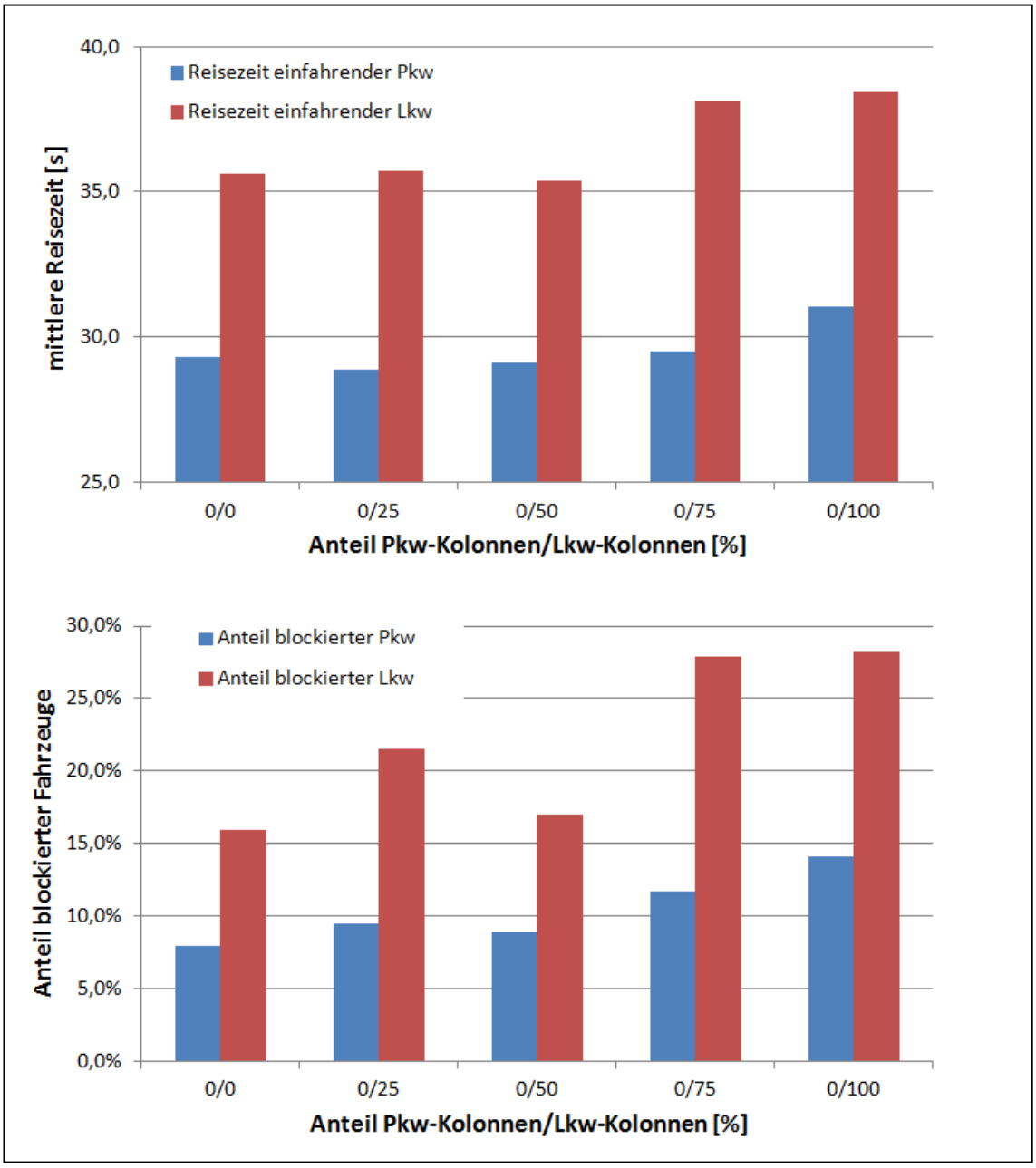


Abbildung 68: Reisezeit und Anteil blockierter einfahrender Fahrzeuge (Szenario 1).

Die Auswertung für Szenario 1 zeigt eine ansteigende Tendenz der Reisezeiten bei einer Steigerung des Anteils der Lkw-Kolonnen. Dies trifft für Lkw und Pkw zu. Lkw weisen aufgrund ihrer im Mittel geringeren Wunschgeschwindigkeit und des geringeren Beschleunigungsvermögens generell höhere Reisezeiten auf. Mit einem wachsenden Anteil an Lkw-Kolonnen nimmt der Platzbedarf von Lkw auf dem rechten Fahrstreifen

ab. Die entstehenden Lücken werden jedoch aufgrund des Rechtsfahrgebots mit Pkw gefüllt. Hinzu kommt, dass die Wunschgeschwindigkeit von Pkw in der Untersuchung bis zu 160 km/h betragen kann. Sofern sich ein solcher Pkw auf dem rechten Fahrstreifen befindet ist ein Fahrstreifenwechsel speziell für einfahrende Lkw aufgrund der großen Geschwindigkeitsdifferenz kaum möglich. Ein schneller Pkw auf dem linken Fahrstreifen der Hauptfahrbahn verhindert gegebenenfalls, dass sich Lkw-Kolonnen kooperativ verhalten können. Aber auch die Abmessungen einer Lkw-Kolonne erschweren bereits den Fahrstreifenwechsel, so dass sich ein hoher Anteil an Lkw-Kolonnen bei entsprechenden Verkehrsstärken insgesamt negativ auswirkt.

Die Auswertung des Anteils der blockierten Fahrzeuge bestätigt die Entwicklung der Reisezeiten und zeigt eine ansteigende Tendenz. Besonders beim Vergleich der Simulationsfälle 0%/0% und 0%/25% zeigt sich, dass neben der Betrachtung der Reisezeiten auch die Analyse der blockierten Fahrzeuge hilfreich sein kann. Während die mittleren Reisezeiten für einfahrende Lkw nahezu unverändert bleiben, nimmt der Anteil der blockierten Lkw von 15,9 % auf 21,6 % zu. Analog zu den Reisezeiten weisen Lkw auch bei der Blockadequote höhere Werte als Pkw auf. Aufgrund ihrer äußeren Abmessungen und der geringeren Beschleunigungsfähigkeit ist für sie der Fahrstreifenwechsel auf die durchgehende Hauptfahrbahn erschwert. Die Auswertung zeigt jedoch auch, dass einfahrende Lkw im Vergleich zu einfahrenden Pkw bei einer Steigerung der Lkw-Kolonnen überproportional blockiert werden. Während der Anteil blockierter Pkw um maximal etwa 6 % zunimmt, nimmt der Anteil blockierter Lkw um maximal 12 % zu.

In Abbildung 69 werden die Ergebnisse für Szenario 2 in analoger Form dargestellt. Da in diesem Szenario Lkw- und Pkw-Kolonnen mit denselben Anwendungsraten vorausgesetzt werden, ist die Zahl der Kolonnen auf der durchgehenden Hauptfahrbahn bereits deutlich größer. Die Auswertung für Szenario 2 zeigt bei den mittleren Reisezeiten für Pkw in der Tendenz eine positive Entwicklung, so dass die Reisezeiten stets unter dem Niveau der Ausgangssituation 0%/0% verbleiben. Auch bei den Reisezeiten einfahrender Lkw ist dieser Trend erkennbar.

Die Analyse des Anteils blockierter Pkw ergibt einen analogen Verlauf zu den Reisezeiten. Die fallende Tendenz für den Anteil blockierter Lkw ist erst ab einem Kolonnenanteil von 50 % erkennbar. Bei niedrigeren Kolonnenanteilen zeichnet sich zunächst keine eindeutige Entwicklung ab. Dieser Effekt kann jedoch auch der natürlichen Streuung unterworfen sein. Im Gegensatz zu Szenario 1 zeigt sich bei Szenario 2 für steigende Kolonnenanteile eine positive Entwicklung durch die Kolonnennutzung. Dies ist dadurch zu erklären, dass nun der Effekt der geringeren Raumbeanspruchung verstärkt hervortritt. Sobald sehr viele Verkehrsteilnehmer die Möglichkeit zur Kolonnenteilnahme nutzen, steigt die Kapazität des Streckenabschnitts deutlich an (siehe auch Kapitel 10.1.1), Die dadurch entstehenden freien Verkehrsräume ermöglichen es einfahrenden Fahrzeugen, mit größerer Wahrscheinlichkeit ohne Blockade den Fahrstrei-

fen zu wechseln. Zudem steigt auch die Wahrscheinlichkeit, dass sich Verkehrsteilnehmer auf der durchgehenden Hauptfahrbahn kooperativ verhalten können.

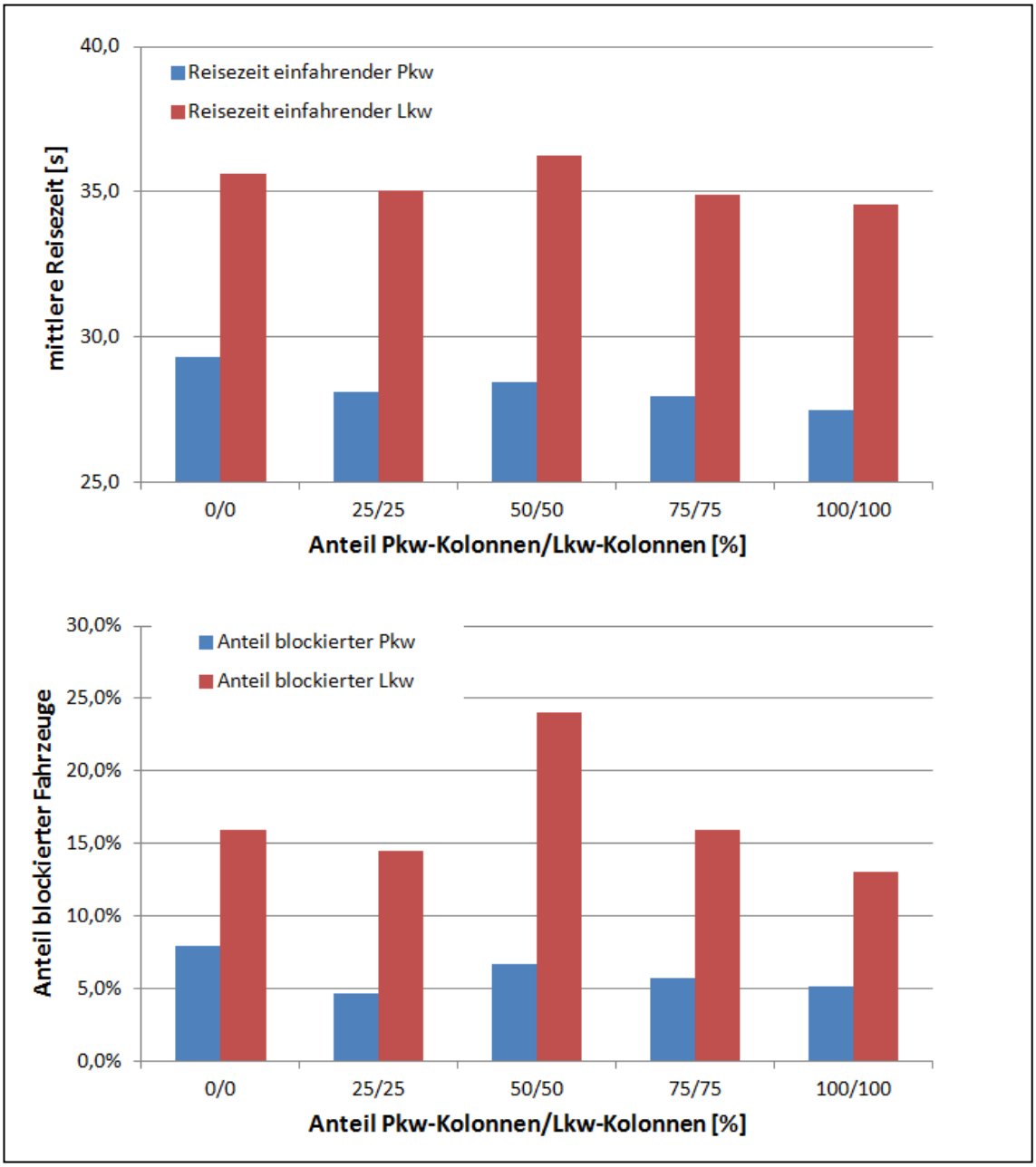


Abbildung 69: Reisezeit und Anteil blockierter einfahrender Fahrzeuge (Szenario 2).

Nachfolgend sollen die zuvor gezeigten Ergebnisse aus Szenario 1 und Szenario 2 in einem gemeinsamen Diagramm gezeigt werden. Hierfür werden die mittleren Reisezeiten beziehungsweise die Anteile der blockierten Fahrzeuge über der Anzahl der Kolonnen auf der Hauptfahrbahn aufgetragen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind in Abbildung 70 die Reisezeit und der Anteil blockierter Fahrzeuge lediglich für einfahrende Pkw dargestellt. Wie die Auswertungen in Abbildung 68 und Abbildung 69 jedoch bereits gezeigt haben, ergeben sich für Lkw qualitativ ähnliche Verläufe. Für eine breitere Datenbasis werden zudem die Ergebnisse aus Szenario 3, bei dem Lkw- und Pkw-

Kolonnen in verschiedenen Anteilen vorkommen, ergänzt. Im oberen Diagramm sind die Kolonnenzusammensetzungen des jeweiligen Messpunktes angegeben. „25/100“ bedeutet hierbei, dass 25 % aller Pkw und 100 % aller Lkw an einer Kolonne teilnehmen.

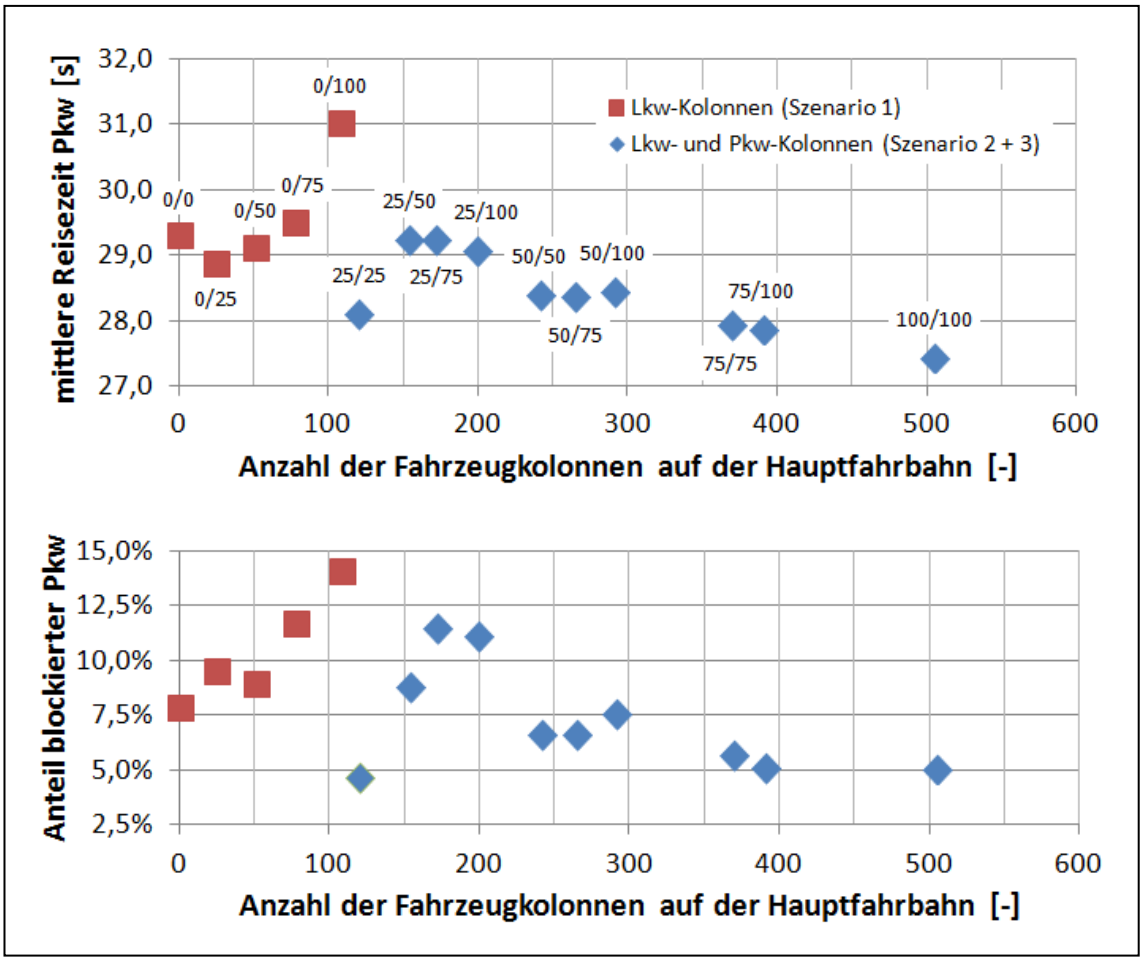


Abbildung 70: Reisezeit und Anteil blockierter einfahrender Pkw.

Betrachtet man in Abbildung 70 zunächst jeweils die fünf roten Messpunkte (0 % Pkw-Kolonnen, Lkw-Kolonnen variabel), so ist nochmals analog zu Szenario 1 in Abbildung 68 auf Seite 186 zu erkennen, dass Reisezeiten einfahrender Pkw und der Anteil blockierter Pkw mit wachsender Anzahl Lkw-Kolonnen zunehmen. Die blauen Messpunkte mit einem Pkw-Kolonnenanteil von 25 % (25/25, 25/50, 25/75, 25/100) zeigen bei Zunahme der Lkw-Kolonnen einen ähnlichen Verlauf. Besonders im unteren Diagramm ist die steigende Anzahl blockierter Pkw deutlich erkennbar. Das Niveau der ermittelten Werte für die Reisezeit und den Anteil blockierter Fahrzeuge sinkt jedoch im Vergleich zu den roten Messpunkten. Die Auswertung für einen Pkw-Kolonnenanteil von 50 % (50/50, 50/75, 50/100) zeigt die zuvor genannten Tendenzen ebenfalls, wenn auch in abgeschwächter Form. Bei 75 % Pkw-Kolonnen (75/75, 75/100) sind keine negativen Auswirkungen der Lkw-Kolonnen mehr erkennbar. Mithilfe von Abbildung 70 lässt sich für die durchgeführte Untersuchung folglich zusammenfassen:

- Eine zunehmende Anzahl Lkw-Kolonnen hat negative Auswirkungen auf Fahrzeuge auf dem Einfädelstreifen.
- Die negativen Auswirkungen der Lkw-Kolonnen werden mit zunehmendem Anteil der Pkw-Kolonnen abgeschwächt beziehungsweise es werden zum Teil sogar positive Auswirkungen erzielt.
- Die theoretisch berechneten Kapazitätssteigerungen bei hohen Anwendungsquoten der Kolonnenfahrt bei Pkw (Kapitel 10.1.1) zeigen bei dieser Untersuchung ihren positiven Einfluss auf die Reisezeiten und auf den Anteil blockierter einfahrender Fahrzeuge.

Sofern das System zur autonomen Kolonnenfahrt zunächst im Lkw-Bereich Anwendung findet, ist es folglich für die Akzeptanz der Fahrzeugkolonnen sinnvoll, in der Systemsteuerung ein kooperatives Verhalten im Bereich von Autobahneinfahrten vorzusehen. Dabei muss jedoch davon ausgegangen werden, dass ein kooperativer Fahrstreifenwechsel der Lkw-Kolonne oft nicht möglich ist. Eine alternative Lösungsmöglichkeit stellt die Vergrößerung der Fahrzeugfolgeabstände an Autobahneinfahrten dar, so dass beispielsweise kurzzeitig mehrere kleine Teilkolonnen gebildet werden. Fremdfahrzeuge, die sich für einen kurzen Zeitraum in der Kolonne aufhalten müssen dabei toleriert werden können (siehe auch Kapitel 9.2.3).

10.2 Einfluss von Fahrzeugkolonnen auf den Energiebedarf

Die Kolonnenfahrt hat durch zwei wesentliche Effekte einen Einfluss auf den Energiebedarf von Fahrzeugen. Einerseits wird durch den „Windschatteneffekt“ der Luftwiderstand der Kolonnenfahrzeuge reduziert, andererseits wird durch eine möglichst gleichmäßige Fahrt der Energiebedarf für Beschleunigungsvorgänge verringert. Das bereits vorgestellte Projekt SARTRE nennt beispielsweise für die dort betrachteten inhomogenen Kolonnen eine Energieeinsparung von 10 bis 20 % (vgl. u.a. Robinson et al., 2010), bei den von KONVOI betrachteten homogenen Lkw-Kolonnen werden Kraftstoffersparnisse von bis zu 17% genannt (IKA, 2005).

Im Folgenden werden die Ermittlung des Energiebedarfs auf Basis der Fahrwiderstände betrachtet und die qualitativen Einflüsse durch die Kolonnenfahrt aufgezeigt (Kapitel 10.2.1). Anschließend werden diese anhand der in Kapitel 10.1 definierten Strecke betrachtet, um das Einsparpotential quantitativ bewerten zu können (Kapitel 10.2.2).

10.2.1 Berechnung des Energiebedarfs

Der Energiebedarf eines Fahrzeugs ergibt sich näherungsweise aus der Fahrwiderstandskraft, die über die Strecke integriert wird:

$$E_B = \int_{s_1}^{s_2} F_W \, ds$$

$$E_B = \int_{s_1}^{s_2} \left[m * g * \left(f_R * \cos(\alpha(s)) + \sin(\alpha(s)) + (1+\epsilon) * \frac{a(s)}{g} \right) + \frac{\rho}{2} * c_W * A * v(s)^2 \right] ds$$

mit

E_B Energiebedarf

F_W Fahrwiderstandskraft

s zurückgelegter Weg

m Fahrzeugmasse (Masseverlust durch Spritverbrauch vernachlässigt)

g Ortsfaktor (9,81 m/s^2)

f_R Rollwiderstandsbeiwert

α Streckensteigung

ε Drehmassenzuschlag

a Fahrzeugbeschleunigung

ρ Luftdichte (1,23 kg/m^3)

c_W Luftwiderstandsbeiwert

A Fahrzeugstirnfläche

v Fahrgeschwindigkeit (Windgeschwindigkeit wird vernachlässigt).

Details zu den Fahrwiderständen sind beispielsweise bei Haken (2008) zu finden (vgl. auch Kapitel 8.2.3). Bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor, wie sie in dieser Arbeit betrachtet werden, wird die chemische Energie des Brennstoffes (Benzin, Diesel oder Gas) im Verbrennungsmotor zunächst in thermische und schließlich in mechanische Energie umgewandelt. Nicht berücksichtigt wird in dieser grundlegenden Betrachtung der Energiebedarf durch weitere Verbraucher im Fahrzeug (z.B. Beleuchtung, Klimaanlage). Des Weiteren muss berücksichtigt werden, dass bei der Verzögerung der Anteil der Beschleunigungsenergie betragsmäßig deutlich größer sein kann als der des Rollwiderstandes – und der Term dadurch negativ wird. Dies entspricht einer Energierückgewinnung. Vereinfachend werden daher negative Fahrwiderstandskräfte auf den Wert Null gesetzt.

10.2.1.1 Reduktion des Luftwiderstands

Wie eingangs bereits erwähnt, kann der Energiebedarf durch einen kleineren Luftwiderstandsbeiwert c_W der Kolonnenfahrzeuge verringert werden. Ursache hierfür sind die aerodynamischen Interferenzerscheinungen, bei denen sich die Umströmung der betrachteten Körper gegenseitig beeinflusst. In Bezug auf hintereinander fahrende Fahrzeuge wird auch meist der Begriff „Windschatteneffekt“ verwendet.

Die Interferenzerscheinungen sind stark abhängig von den betrachteten Körpern, deren Anzahl und deren Folgeabstände, Abbildung 71.

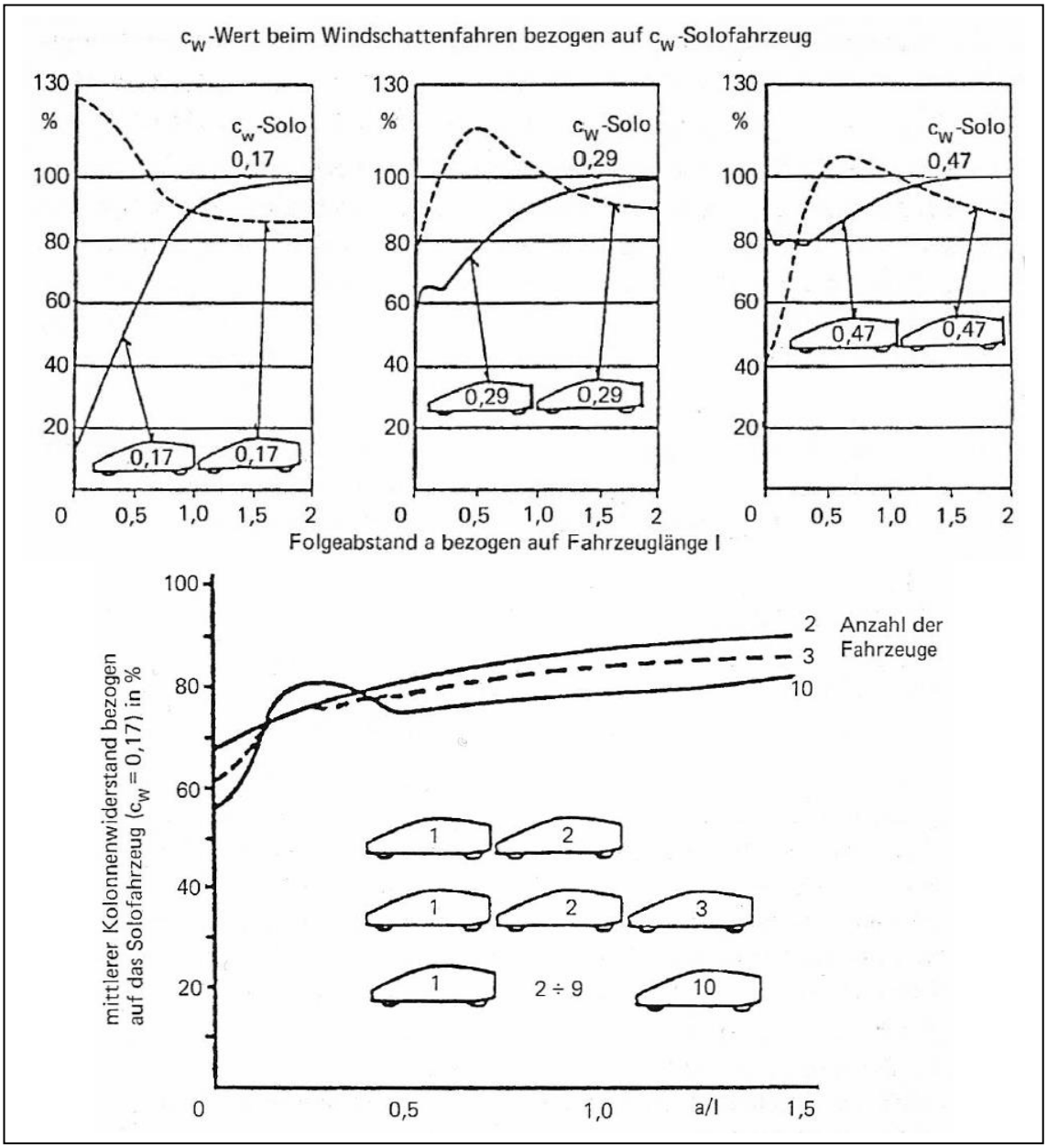


Abbildung 71: Einfluss des Folgeabstands auf den c_W-Wert von Pkw in Abhängigkeit vom Folgeabstand (oben) und der Fahrzeuganzahl (unten). (Hucho, 1999; S. 192 und S. 193)

Eine bei Hucho (1999) aufgeführt Untersuchung für jeweils identische Fahrzeuge zeigt, dass diese unterschiedlich stark von der Folgefahrt, in Abhängigkeit vom Folgeabstand, profitieren bzw. benachteiligt werden, siehe Diagramme oben in Abbildung 71.

Der Luftdruck am Heck des Führungsfahrzeugs wird durch das Folgefahrzeug angehoben, wodurch der Luftwiderstand des Führungsfahrzeugs reduziert wird. Die Auswirkungen auf den Luftwiderstand des Folgefahrzeugs sind vom Folgeabstand abhängig.

Werden diese Ergebnisse für die gesamte Kolonne betrachtet, so ergibt sich im Mittel eine Luftwiderstandsreduzierung von ca. 20 % für den gesamten Fahrzeugzug (Abbildung 71, unteres Diagramm).

Die Auswirkungen können aufgrund der unbekannten Fahrzeugzusammensetzung und Fahrzeugtypen nur ungenau ermittelt werden. Für genauere Ergebnisse und Abhängigkeiten wären Strömungssimulationen, Windkanal- und Feldversuche notwendig. Es kann daher auch kein allgemeingültiger optimaler Folgeabstand im Hinblick auf die energetische Betrachtung angegeben werden. Man kann jedoch die Aussage treffen, dass im Allgemeinen für Kolonnen mit mehr als zwei Fahrzeugen durch möglichst geringe Folgeabstände im Mittel die größte Reduktion des c_W-Wertes, bezogen auf das Einzelfahrzeug, erreicht wird. Aus diesem Grund werden die in Kapitel 8.2.4 und 8.2.5 ermittelten Folgeabstände übernommen.

Für die Betrachtung des Energiebedarfs von homogenen Kolonnen werden daher die in Abbildung 72 dargestellten Werte angenommen, die sich an den bei Hucho (1999) aufgeführten Ergebnissen orientieren.

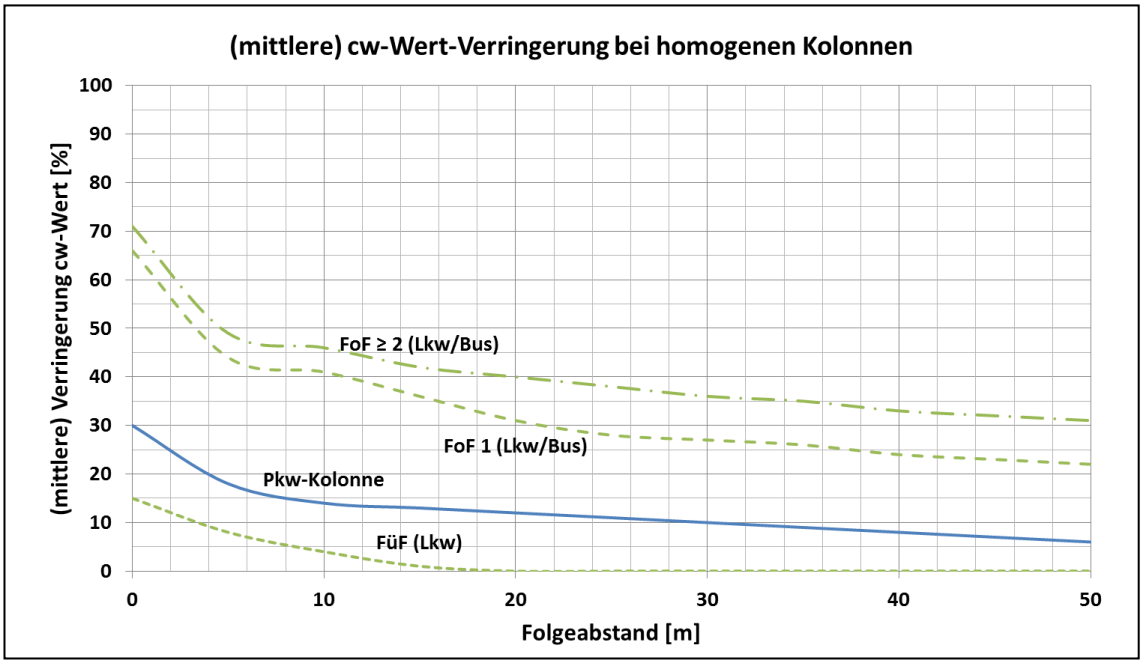


Abbildung 72: (Mittlere) Verringerung des c_W-Werts für homogene Lkw-/Bus- und Pkw-Kolonnen. (In Anlehnung an Hucho, 1999; S. 193/399)

Für Pkw-Kolonnen ist die durchschnittliche Reduktion des c_W-Wertes dargestellt, bezogen auf den c_W-Wert des Einzelfahrzeugs. Bei einem Folgeabstand von z.B. 10 m reduziert sich der c_W-Wert der Pkw-Kolonnenteilnehmer um durchschnittlich ca. 14 %. Für homogene Lkw- bzw. Bus-Kolonnen ist die Verringerung des c_w-Wertes für das Führungsfahrzeug (FüF) sowie die Folgefahrzeuge (FoF) getrennt aufgetragen. Es ergibt sich für das Führungsfahrzeug bei 10 m Folgeabstand eine Verringerung des c_W-Wertes um ca. 4 %, während das zweite Fahrzeug, also das erste Folgefahrzeug, von

einer Verringerung um ca. 40 % profitiert. Für das zweite und jedes weitere Folgefahrzeug ergibt sich eine Reduktion des c_W-Wertes um ca. 46% bei 10 m Folgeabstand. Literaturwerte, die den c_W-Wert für Pkw als Folgefahrzeuge hinter Lkw angeben, konnten nicht gefunden werden. Daher werden, wie auch in den durchgeführten Verkehrsflusssimulationen, nur homogene Kolonnen betrachtet.

Um die Auswirkung der aerodynamischen Einflüsse auf den Energiebedarf bewerten zu können, wird der Energiebedarf für die in Kapitel 10.1.2 betrachtete 25 km lange Autobahnstrecke sowohl für Einzelfahrzeuge als auch für Kolonnen ermittelt. Für diese grundlegende Betrachtung wird eine konstante Fahrgeschwindigkeit über den gesamten Streckenverlauf angenommen, um nur die aerodynamischen Einflüsse zu bewerten. Die ermittelten Werte entsprechen damit dem minimalen Energiebedarf der betrachteten Fahrzeuge bei Konstantfahrt und sollen das Potential der Kolonnenfahrt mit deren aerodynamischen Vorteilen verdeutlichen.

Wie erwartet kann der Energiebedarf durch den reduzierten Luftwiderstand der Kolonnenteilnehmer verringert werden. Vor allem bei Lkw und Reisebussen ergeben sich aufgrund der vorhandenen aerodynamischen Eigenschaften große Einsparpotentiale gegenüber der gleichen Anzahl an Einzelfahrzeugen, siehe Abbildung 73.

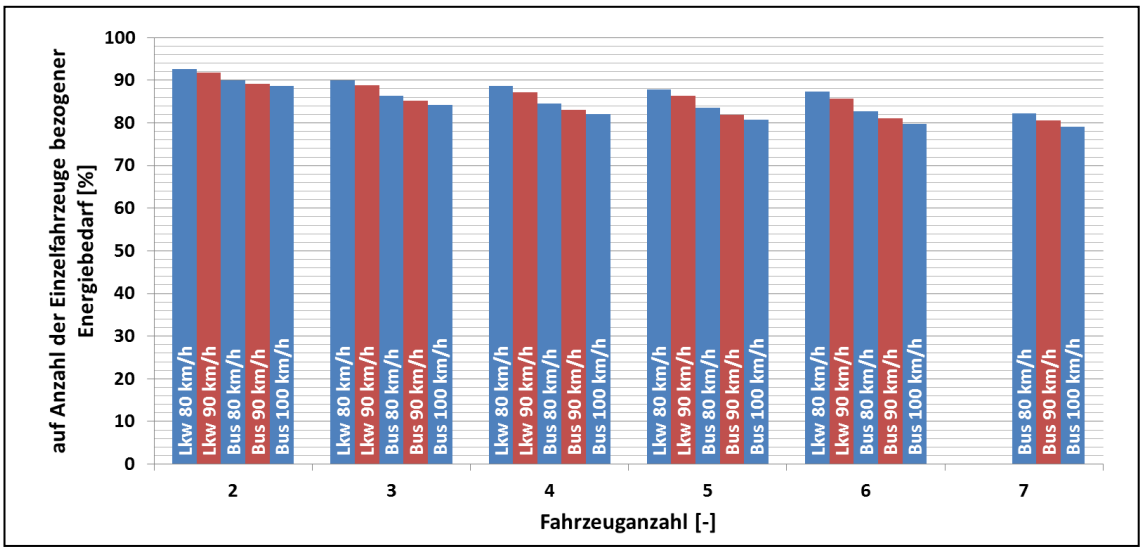


Abbildung 73: Energiebedarf homogener Lkw- bzw. Bus-Kolonnen im Vergleich zur gleichen Anzahl an Einzelfahrzeugen.

Bei Lkw reichen diese bei 80 km/h von ca. 7,5 bis 13 % bei zwei bis sechs Fahrzeugen je Kolonne. Aufgrund der Beschränkung der maximalen Kolonnenlänge wurde eine aus sieben Fahrzeugen bestehende Lkw-Kolonne nicht betrachtet. Bei zwei bis sieben Reisebussen ist aufgrund der besseren Aerodynamik eine Reduktion von 11 bis 19,5 % bei 90 km/h möglich.

Das Einsparpotential bei Pkw-Kolonnen liegt bei 9,5 bis 11 % gegenüber der gleichen Anzahl an Einzelfahrzeugen. In Abbildung 74 ist das Einsparpotential über der Ge-

schwindigkeit aufgetragen und unabhängig von der Fahrzeuganzahl, da hier eine durchschnittliche Reduktion des c_W-Werts für alle Kolonnenfahrzeuge angenommen wurde (vgl. Abbildung 72, Seite 193).

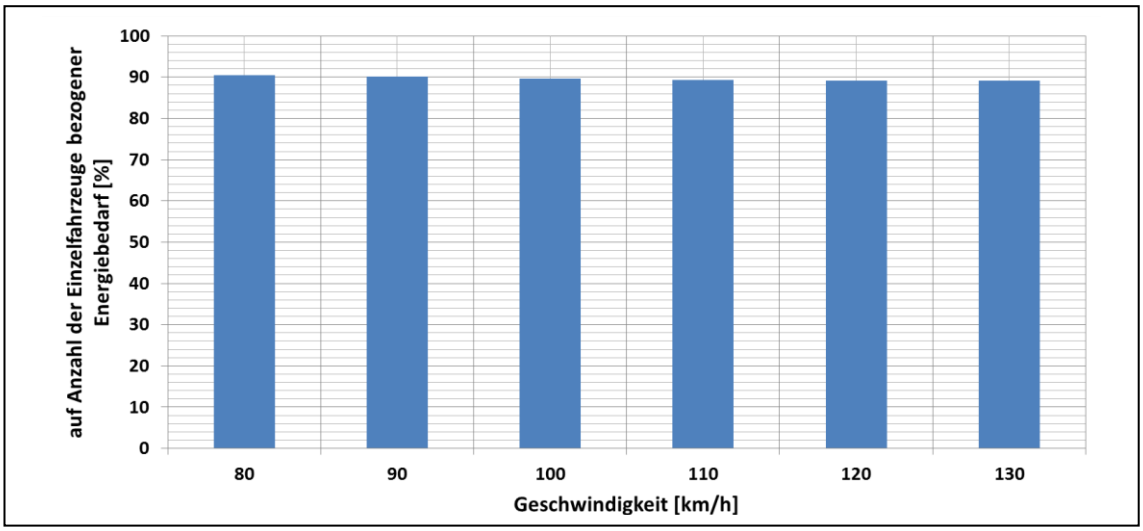


Abbildung 74: Energiebedarf einer homogenen Pkw-Kolonne im Vergleich zur gleichen Anzahl an Einzelfahrzeugen.

Der Energieverbrauch kann mit höheren Geschwindigkeiten anteilig stärker reduziert werden, da der Anteil des Luftwiderstandes mit höherer Geschwindigkeit zunimmt – und die Verringerung des c_W-Wertes damit eine größere Bedeutung erhält. Außerdem ist das Einsparpotential umso größer, je mehr Fahrzeuge sich in der Kolonne befinden. Die Verringerung des Energiebedarfs fällt bei Lkw- und Reisebussenkolonnen aufgrund der aerodynamischen Gegebenheiten[24] größer aus als bei Pkw-Kolonnen. Bei inhomogenen Kolonnen sind ähnliche Einsparpotentiale zu erwarten. Hier können die Pkw, die sich unmittelbar hinter einem Lkw bzw. Reisebus befinden, von deren größeren Windschatten stärker profitieren. An dieser Stelle ist noch anzumerken, dass bereits bei normalen Verkehrsbedingungen bei den einzuhaltenden Sicherheitsabständen aerodynamische Interferenzerscheinungen vorhanden sind, die in dieser Arbeit jedoch nicht betrachtet werden.

Die Reduktion des Energiebedarfs ist – bei konstant angenommenem Wirkungsgrad der Verbrennungskraftmaschinen – gleichbedeutend mit der Reduktion des Kraftstoffverbrauchs. Die Kolonnenfahrt bietet also Vorteile bezüglich Umweltfreundlichkeit und Wirtschaftlichkeit (siehe auch Kapitel 10.4).

[24] Die Unterdruckgebiete hinter den Fahrzeugen, die letztendlich eine Kraft entgegen der Fahrtrichtung bewirkt und von der Antriebskraft überwunden werden muss, sind bei Lkw und Bussen deutlich größer als bei Pkw, weshalb homogene Lkw-/Bus-Kolonnen ein größeres Einsparpotential aufweisen.

10.2.1.2 Reduktion des Beschleunigungswiderstands

Neben den aerodynamischen Einflüssen der Kolonnenfahrt kann davon ausgegangen werden, dass durch die Verwendung von ACC im Führungsfahrzeug die Anzahl starker Bremsvorgänge deutlich abnimmt (vgl. Benmimoun et al., 2013). Dadurch wird insgesamt ein gleichmäßigeres Fahrverhalten mit weniger Beschleunigungsanteilen erreicht, wodurch auch wiederum der Energiebedarf gesenkt werden kann. In der von Benmimoun et al. (2013) untersuchten Feldstudie wurde allein durch die Verwendung von ACC eine Reduktion des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchs auf Autobahnen um 2,77 % erreicht.

Wie auch in Kapitel 10.1.2 bei der Betrachtung des Verkehrsflusses auf freier Strecke gezeigt wurde, kann durch die Kolonnenfahrt die Anzahl an Interaktionen zwischen den Verkehrsteilnehmern reduziert werden. Dadurch reduziert sich wiederum auch die Anzahl der Bremsmanöver bzw. der Beschleunigungseffektivwert – und damit auch der Energiebedarf der Fahrzeuge, wie im folgenden Abschnitt gezeigt wird.

Eine weitere Möglichkeit zur Reduktion von Beschleunigungs- und Bremsvorgängen bietet die in Kapitel 5.5.4 beschriebene C2C-Communication, durch die frühere Reaktionen auf Geschwindigkeitsänderungen möglich sind und der Verkehrsfluss dadurch harmonisiert werden kann (siehe auch Plößl, 2008).

10.2.2 Auswertung des Energiebedarfs bei Kolonnenfahrt

In diesem Abschnitt sollen die Auswirkungen der Kolonnenfahrt auf den Energiebedarf, basierend auf der vorgestellten Gleichung auf Seite 190, anhand der in Kapitel 10.1.2 vorgestellten Simulationen quantifiziert werden. Wie bereits in Abschnitt 10.1.2.2 bei der Betrachtung des Verkehrsablaufs werden vier ausgewählte Fälle mit der Ausgangssituation verglichen, wobei sich angeführte Prozentwerte auf den Standardfall 0%/0% beziehen. Es werden die in Kapitel 8.2.1 definierten Fahrzeuge (Nullfall) auf dem in Kapitel 10.1 definierten 25 km langen Autobahnabschnitt ohne Steigungen betrachtet. Für Lkw besteht ein Überholverbot.

Da alle benötigten Fahrzeugdaten angenommen und vor allem die aerodynamischen Effekte nur stark vereinfacht betrachtet werden können (siehe Abschnitt 10.2.1.1), können Ergebnisse nur als erste Anhaltswerte angesehen werden. Zudem gelten die für die Energiegleichung genannten Einschränkungen. Des Weiteren wird bei den Berechnungen der Masseverlust durch den Kraftstoffverbrauch vernachlässigt bzw. eine konstante Fahrzeugmasse angenommen. Wie bei den Verkehrsflusssimulationen wird vereinfachend ein konstanter Folgeabstand angenommen. In Abbildung 75 sind die Ergebnisse für den Energiebedarf von Pkw (oben) und Lkw (unten) dargestellt. Es wurde jeweils der arithmetische Mittelwert für alle Fahrzeuge in jedem Simulations-

durchgang ermittelt und über der mittleren Reisegeschwindigkeit aufgetragen. Die Ergebnisse werden im Folgenden kurz vorgestellt.

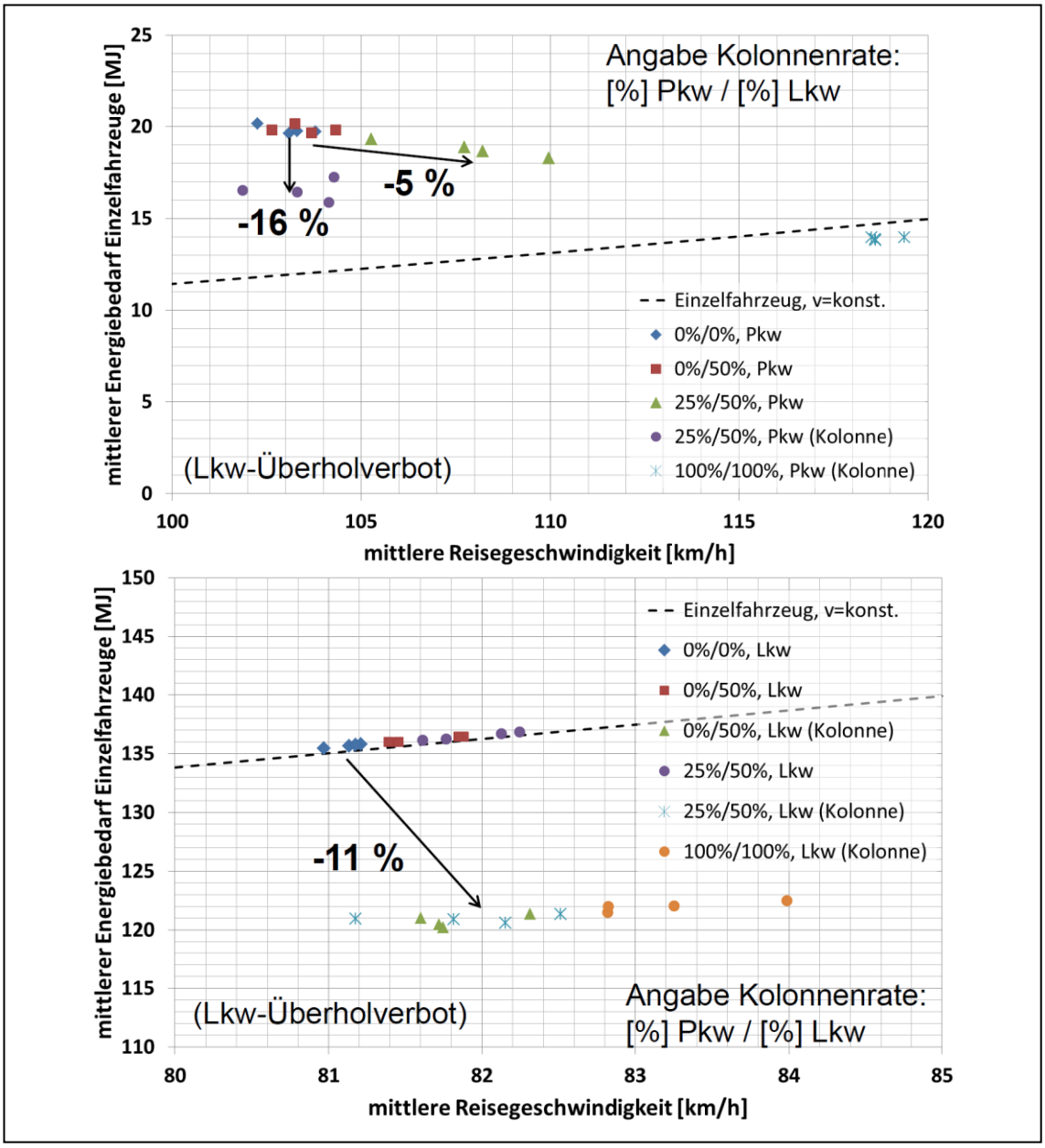


Abbildung 75: Auswirkungen der Kolonnenfahrt auf den Energiebedarf von Pkw (oben) und Lkw (unten) für einen 25 km langen Autobahnabschnitt.

Bei Pkw zeigt sich, dass der ermittelte Energiebedarf auch in Pkw-Kolonnen (ausgenommen 100%/100%) nicht erreicht werden kann, da die Fahrzeuge für die betrachteten Anwendungsraten nach wie vor zu oft in Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmern verwickelt sind. Dadurch erhöht sich der Anteil des Beschleunigungswiderstandes am Energiebedarf. Des Weiteren wird deutlich, dass bei 50% Lkw-Kolonnenanteil und bestehendem Lkw-Überholverbot keine nennenswerten Auswirkungen auf den Energiebedarf der Pkw feststellbar ist. Befinden sich jedoch nun zu-

sätzlich 25 % der Pkw in Kolonnen, so kann für die frei fahrenden Pkw trotz höherer Reisegeschwindigkeiten der Energiebedarf im Mittel um ca. 5 % reduziert werden. Dies ist auf den im Mittel 15 % geringeren Effektivwert der Beschleunigung gegenüber dem Standardfall 0%/0% zurückzuführen (vgl. Ergebnisse in Kapitel 10.1.2.2). Die Reduktion des Energiebedarfs für die in Kolonnen befindlichen Pkw fällt ebenfalls deutlich auf. Sie profitieren durch die Kolonnenfahrt um einen im Mittel 16,4 % geringeren Energiebedarf bei gleichbleibender mittlerer Reisegeschwindigkeit. Dies ist analog zu den frei fahrenden Pkw auf den geringeren Beschleunigungsanteil zurückzuführen, durch die verbesserte Aerodynamik kann der Energiebedarf jedoch deutlich stärker verringert werden.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen bei Pkw zeigt sich bei Lkw, dass für die betrachteten Randbedingungen der Energiebedarf im Verkehrsfluss dem minimalen Energiebedarf sehr nahe kommt. Mit steigendem Kolonnenanteil (0%/50% bzw. 25%/50%) steigt zwar der Energiebedarf an, dies ergibt sich jedoch zwangsläufig durch die höhere Reisegeschwindigkeiten. Für die Lkw in Kolonnen ergibt sich trotz höheren mittleren Reisegeschwindigkeiten sowohl für 0%/50% als auch für 25%/50% eine Reduktion des Energiebedarfs von ca. 11 % gegenüber dem Standardfall. Den größten Anteil tragen hier die aerodynamischen Effekte bei.

Durch entsprechende Kolonnen-Anwendungsraten kann der Energiebedarf also deutlich reduziert werden. Dies dürfte die Kolonnenfahrt vor allem für Speditionen attraktiv machen, da bei den vorliegenden hohen Laufleistungen die Systemkosten zeitnah amortisiert werden könnten, siehe auch Kapitel 10.4.

10.3 Einfluss von Fahrzeugkolonnen auf die Verkehrssicherheit

Die Auswirkungen der Kolonnenfahrt auf die Verkehrssicherheit können nicht unmittelbar genannt werden. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass durch die Verwendung der vorgestellten Fahrerassistenzsysteme wie z.B. ACC, FCW, LDW/LKS eine Verbesserung der Verkehrssicherheit erreicht werden kann. Dabei wird jedoch vorausgesetzt, dass das System zur Kolonnenfahrt entsprechend „sicher“ ist, was u.a. durch die Handlungsstrategien sichergestellt werden muss.

Der positive Einfluss der Assistenzsysteme wurde in mehreren Studien nachgewiesen. Die aufgeführte Feldstudie von Benmimoun et al. (2013) zeigt beispielsweise die Auswirkungen von ACC und FCW. Dort konnte das Abstandsverhalten durch die Verwendung von ACC-Systemen verbessert werden: Die Zahl kritischer Abstände mit einer Zeitlücke kleiner 0,5 s wurde in dem Feldversuch um 73 % verringert, wodurch die durchschnittliche Zeitlücke wiederum um 16 % vergrößert wurde. Insgesamt verringert sich dadurch auch die Frequenz starker Bremsvorgänge deutlich. Das veränderte Abstandsverhalten hat einen positiven Einfluss auf die Verkehrssicherheit, da längere

Reaktionszeiten möglich sind – und der Fahrer bei kritischen Abständen durch das System darauf aufmerksam gemacht wird.

Des Weiteren können die bereits in vorhergehenden Kapiteln erwähnten Abschätzungen aufgeführt werden:

- Reduktion der Auffahrunfälle von Lkw auf Autobahnen infolge zu geringer Abstände bzw. Unaufmerksamkeit um ca. 70-90 % durch bald gesetzlich vorgeschriebene Verwendung von ACC und Notbremssystemen (Winner et al. (2012) bzw. Reif (2010b)).
- Reduktion der Pkw-Unfälle durch Abkommen vom Fahrstreifen um ca. 25 % durch LDW- bzw. LKS-Systeme (Winner et al., 2012)
- Reduktion der Lkw-Unfälle durch Abkommen vom Fahrstreifen um ca. 49 % durch die zukünftig vorgeschriebenen LDW-Systeme (Winner et al., 2012).

Insgesamt ist also von einer Verbesserung der Verkehrssicherheit auszugehen. Diese wird dann jedoch nicht auf die Kolonnenfahrt zurückzuführen sein, sondern vielmehr auf die dort verwendeten Fahrerassistenzsysteme.

10.4 Einfluss von Fahrzeugkolonnen auf die Wirtschaftlichkeit

In den vorausgehenden Kapiteln wurden u.a. die Auswirkungen der Kolonnenfahrt auf den Verkehrsfluss, den Energiebedarf sowie die Verkehrssicherheit untersucht. Diese Aspekte besitzen wiederum finanzielle Auswirkungen auf die Volkswirtschaft sowie auch auf verschiedene Bereiche der Arbeitswelt. In diesem Kapitel sollen daher einige dieser Punkte angesprochen werden.

Ausführliche Untersuchungen zu den volkswirtschaftlichen Auswirkungen durch die Fahrzeugkommunikation wurden im Juni 2013 im Rahmen des sim^{TD} Projekts vorgestellt. Eine flächendeckende Einführung der Fahrzeugkommunikation bietet gemäß den Ergebnissen ein volkswirtschaftliches Einsparpotential von über 11 Mrd. € pro Jahr. 6,5 Mrd. € tragen dazu die Vermeidung von Unfällen bei. Etwa 5 Mrd. € werden durch eine Reduktion der Umweltschäden eingespart. (vgl. Winterhagen, 2013). Die Betrachtungen enthalten die Berücksichtigung einer erhöhten Fahr- und Verkehrssicherheit sowie die Verbesserung von Reisezeiten, die wiederum Emissions-, Fahrzeugbetriebs- und Kohlenstoffdioxidkostenersparnisse mit sich bringen. Zur Ermittlung der Einsparungen wurden Unfallsimulationen durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass das sogenannte „elektronische Bremslicht“, das auf Bremsvorgänge weiter vorausfahrender Fahrzeuge aufmerksam macht, den größten Nutzen erzielt (vgl. SimTD, 2013). Ullrich Eichhorn, Technikgeschäftsführer des Verbandes der Automobilindustrie, schätzt, dass jeder Euro, der in die Vernetzung der Fahrzeuge investiert wird, den 8-fachen wirtschaftlichen Nutzen erzielt (vgl. Winterhagen, 2013).

Da Fahrzeuge mit der Möglichkeit zur Kolonnenteilnahme ebenfalls über die Möglichkeit zur Fahrzeugkommunikation verfügen müssen, lässt sich das vorgestellte Ergebnis auf die Kolonnenfahrt übertragen. Eine Verstetigung des Verkehrsflusses und eine Reduktion von Stauzeiten sind dabei bereits berücksichtigt. Stauzeiten können durch die autonome Kolonnenfahrt jedoch nochmals zusätzlich reduziert werden, da die Kapazität eines Straßenquerschnitts bei entsprechenden Anwendungsraten deutlich gesteigert werden kann, wodurch die Staubildung unter Umständen vermieden wird. Ferner wird der volkswirtschaftliche Nutzen durch die autonome Kolonnenfahrt zusätzlich durch die in Kapitel 10.2 angesprochenen Windschatteneffekte beeinflusst. Die Energieeinsparungen sind dabei direkt auf die Einsparungen bei den Spritkosten zu übertragen. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Fahrzeugkommunikation das Verkehrsgeschehen und die Wirtschaftlichkeit im gesamten Straßennetz beeinflusst, während die Vorteile der Kolonnenfahrt lediglich auf Autobahnen und autobahnähnlichen Straßen zum Tragen kommen.

Die Ergebnisse von sim^{TD} berücksichtigen nur den Einsatz warnender, aber nicht aktiv eingreifender Systeme. Beim Einsatz von aktiv eingreifenden Fahrerassistenzsystemen, wie sie u.a. bei Fahrzeugen vorhanden sind, die über Möglichkeiten zur Kolonnenteilnahme verfügen, sind weitere positive Auswirkungen zu erwarten, siehe Abschnitt 10.3. Speziell die Vermeidung von Unfällen und die damit im Zusammenhang stehenden Unfallkosten haben weitreichende Auswirkungen auf verschiedenste Bereiche: So sind neben den Reparatur- und medizinischen Behandlungskosten u.a. auch volkswirtschaftliche Produktionsausfälle, Zeitkosten durch Stau, Polizei- und Rechtsfolgekosten, aber auch Verwaltungskosten der Versicherungen in die Berechnungen mit einzubeziehen (vgl. Vogt, 2012).

Besonders für Unternehmen kann die Kolonnennutzung eine sehr interessante Option darstellen, wenn es den Fahrern in Folgefahrzeugen erlaubt wird, fahrfremden Tätigkeiten nachzugehen. Neben den beachtlichen Energieeinsparungen (siehe Kapitel 10.2), die voraussichtlich die Kosten für den Einbau eines Systems zur Kolonnenfahrt rasch amortisieren, wäre dann zusätzlich von deutlichen Produktivitätssteigerungen auszugehen. Ein Vertreter, der häufig mit seinem Fahrzeug auf der Autobahn unterwegs ist, kann die Zeit der Kolonnenfahrt beispielsweise nutzen, um nachfolgende Termine vorzubereiten oder Emails zu beantworten. Eine weitere offene Fragestellung, die eine politische Entscheidung erfordern wird, ist die Fragestellung nach dem Umgang mit Ruhezeiten. Wird die Zeit, in der ein Lkw als Folgefahrzeug an einer Kolonne teilnimmt, als Ruhe- oder Pausenzeit betrachtet? Verlängert sich dadurch der Zeitraum, den der Fahrer ohne anzuhalten hinter dem Steuer sitzen darf? Ist es vertretbar, dass Pausen im Führerhaus anstatt gemeinsam mit Kollegen auf dem Parkplatz stattfinden? Je nachdem, wie diese offenen Fragen zukünftig beantwortet werden, kann beispielweise auch die Effizienz für Busunternehmen gesteigert werden. Bei großen Ausfahrten mit mehreren Bussen muss häufig ein zweiter Fahrer je Bus eingeplant werden, um die zulässigen Lenkzeiten nicht zu überschreiten. Die autonome Kolonnen-

fahrt bietet hier die Möglichkeit, dass lediglich der Fahrer des Führungsfahrzeugs arbeitet, während die Fahrer der Folgefahrzeuge pausieren.

Da Fahrer von Folgefahrzeugen durch die Übergabe der Fahrzeugsteuerung an das System und den reduzierten Spritbedarf deutliche Vorteile im Vergleich zu Fahrern von Führungsfahrzeugen genießen, ist die Einführung eines Vergütungssystems für die Kolonnennutzung sinnvoll. Dabei ist das Vergütungssystem möglichst so zu gestalten, dass sowohl für das Führungsfahrzeug als auch für die Folgefahrzeuge eine Win-Win-Situation entsteht, um die Kolonnenfahrt attraktiv zu machen. Gegebenenfalls ist auch an ein dynamisch anpassbares Bezahlsystem zu denken, dass die Teilnahmekosten in Abhängigkeit der Kolonnenlänge bestimmt. Des Weiteren ist zu überlegen, ob private und gewerbliche Fahrten auf unterschiedliche Art und Weise abgerechnet werden können, da auch hier ein verschieden großer Nutzen für die Fahrer der Fahrzeuge entsteht.

10.5 Einfluss von Fahrzeugkolonnen auf den Fahrkomfort

Der Fahrkomfort wird von verschiedenen Parametern des Fahrzeugs beeinflusst. In Bezug auf das Fahrwerk zeichnet sich ein hoher Fahrkomfort dadurch aus, dass die gefederte Masse des Fahrzeugs lediglich geringen Beschleunigungen ausgesetzt ist (vgl. Popp & Schiehlen, 2010). Weitere den Fahrkomfort beeinflussende Eigenschaften sind das Geräuschniveau, die Sitze oder die Möglichkeit, bestimmte Fahrertätigkeiten an Fahrerassistenzsysteme zu übergeben. Generell kann ein komfortables Fahrzeug das Wohlbefinden des Fahrers positiv beeinflussen.

Wenngleich die oben beschriebene Definition aus der Fahrwerktechnik die Vertikalbeschleunigung als Größe für den Fahrkomfort meint, so lässt sich die Aussage auch auf Längs- und Querbeschleunigungen übertragen. Querbeschleunigungen lassen sich durch den Einsatz von Spurführungssystemen reduzieren, da das Fahrzeug in der Lage ist, seine Position ohne spürbare Pendelbewegungen an der Fahrstreifenmitte auszurichten. Ein deutlich größerer Einfluss auf den Fahrkomfort ist von der Längsbeschleunigung zu erwarten. Gemäß der Analyse aus Kapitel 10.1.2.2 sorgen autonome Fahrzeugkolonnen für einen besseren Verkehrsfluss in Form einer höheren Reisegeschwindigkeit und einer gleichzeitig reduzierten Anzahl an Bremsmanövern. Für diesen Effekt sind hauptsächlich Pkw-Kolonnen verantwortlich, da Lkw sowohl in Kolonne als auch als Einzelfahrzeuge bereits mit einer weitgehend harmonisierten Geschwindigkeit fahren. Ein harmonisierter Verkehrsfluss ohne häufige Beschleunigungs- und Bremsvorgänge erlaubt es den Fahrern von Folgefahrzeugen vermutlich auch, die gewählte fahrfremde Tätigkeit besser ausüben zu können. Es ist jedoch denkbar, dass ein Fahrer intuitiv aufschreckt und unter Umständen in die Systemsteuerung eingreift, sobald im hochautomatisierten Fahrmodus ein Bremsmanöver erfolgt.

Die Nutzung von Fahrerassistenzsystemen steigert bereits heute den Fahrkomfort, da der Fahrer auf Wunsch Fahraufgaben an ein teilautomatisiertes System übergeben kann. Durch diese Entlastung kann der Fahrer sein Fahrziel entspannter und stressfreier erreichen. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass Vertrauen in die Technik des Fahrzeugs besteht und dass der Fahrer dennoch weiß, wie in Notsituationen – beispielsweise bei einem Systemausfall oder einem plötzlichen Ausweichmanöver, bei dem die autonome Kolonnenfahrt ihre Grenzen erreicht – zu reagieren ist. Fahrer von Folgefahrzeugen, die sich in einer autonomen Fahrzeugkolonne aufgrund des geringen Folgeabstandes unsicher fühlen, werden vermutlichen keinen gesteigerten Fahrkomfort feststellen können. Untersuchungen im Projekt SARTRE (siehe auch Kapitel 6.2.2) haben jedoch ergeben, dass dieses ungute Gefühl lediglich vorübergehend ist und dass sich Fahrer schnell an die geringen Abstände gewöhnen (vgl. Goppelt, 2012).

Die autonome Kolonnenfahrt eignet sich nicht nur für Fahrer, die während der Fahrt einer fahrfremden Tätigkeit nachgehen oder Windschatteneffekte zum Spritsparen ausnutzen möchten, sondern sie kann beispielsweise auch die Mobilität im Alter steigern. Wenn sich ältere Fahrer lange Autobahnetappen nicht mehr zutrauen oder sich auf Autobahnen aufgrund der zum Teil großen Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den Verkehrsteilnehmern nicht sicher fühlen, kann eine Fahrzeugkolonne eine Lösung darstellen. Analog zu einer Reise mit der Bahn müssten keinerlei Fahraufgaben übernommen werden, man genießt jedoch den Vorteil, über das eigene Fahrzeug am Zielort zu verfügen, um dort mobil zu sein.

Als komfortsteigernd kann auch die Zeitersparnis durch die Kolonnennutzung angesehen werden. Wenn beispielsweise während der täglichen Fahrt vom und zum Arbeitsplatz bereits die Zeitung gelesen werden kann oder Emails beantwortet werden können, bleibt mehr Zeit für Freizeittätigkeiten nach der Arbeit.

© VuV 2013

Teil 3

Zusammenfassung und Anlagen

Zusammenfassung und Ausblick

Verzeichnisse

Anlagen

11 Zusammenfassung und Ausblick

Im ersten Teil der Arbeit wurde aufgezeigt, dass die notwendigen technischen Systeme zur Längs- und Querführung der Folgefahrzeuge einer autonomen Kolonne bereits verfügbar sind. Hier bilden Systeme wie die adaptive Geschwindigkeitsregelung (ACC) und Spurführungssysteme (LKS) die technische Basis für die autonome Kolonnenfahrt. Zusätzlich wird für die zuverlässige Kopplung der Fahrzeuge zu einer Kolonne die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation (C2CC) verwendet, durch die der Wirkkreis der Kolonne zuverlässig geschlossen wird.

Aus technischer Sicht ist das System zur autonomen Kolonnenfahrt bereits umsetzbar, wie beispielsweise in den Projekten KONVOI und SARTRE gezeigt wurde. Eine Serienreife ist jedoch noch nicht erreicht, da die Komplexität der Systeme u.a. auch eine besondere Herausforderung bei der Systemabsicherung darstellt. Des Weiteren müssen zahlreiche andere Aspekte berücksichtigt werden, um auch die Kolonnenbildung mit Fahrzeugen verschiedener Hersteller zu ermöglichen. Dabei spielt vor allem die Standardisierung der Fahrzeugkommunikation, wie sie durch das C2C-Communication-Consortium beschlossen wurde, eine wichtige Rolle. Es müssen jedoch auch zahlreiche rechtliche Fragen zu autonomen Fahrzeugen mit hoch- oder vollautomatisierten Fahrmodi geklärt werden, da der Fahrer in diesen Fällen nicht mehr seiner eigentlichen Fahraufgabe nachkommt, wie es im Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr von 1968 festgelegt wurde.

Im Zweiten Teil der Arbeit wurden diese Aspekte sowie Möglichkeiten zur Umsetzung eines Systems zur autonomen Kolonnenfahrt aufgezeigt. Hierzu wurden die vorgestellten Komponenten zu einem Gesamtsystem verknüpft. Außerdem wurden verschiedene Aspekte, wie der Fahrzeugfolgeabstand, erarbeitet. Des Weiteren wurden homogene und inhomogene Kolonnen betrachtet und deren spezifischen Eigenschaften kurz dargestellt.

Nach der Vorstellung der Grundlagen für die autonome Kolonnenfahrt wurden mögliche Interaktionen der Fahrzeuge innerhalb einer Kolonne, sowie Interaktionen einer Kolonne mit anderen Verkehrsteilnehmern betrachtet. Hierfür sind entsprechende Handlungsstrategien notwendig, um eine sichere und zuverlässige Kolonnenfahrt zu ermöglichen. Vor allem bei der Erarbeitung der Handlungsstrategien hat sich gezeigt, dass verschiedenste Aspekte berücksichtigt werden müssen, wobei die Strategien zur Anpassung von Kolonnen sowie Interaktionen an Ein- und Ausfahrten eine besondere Herausforderung für die autonome Kolonnenfahrt darstellen.

Neben der Umsetzung der autonomen Kolonnenfahrt wurden im zweiten Teil der Arbeit auch die Auswirkungen der Kolonnenfahrt, beginnend mit einer theoretischen Kapazitätsanalyse, betrachtet. Die Ergebnisse der theoretischen Analyse zeigen, dass durch die Kolonnenfahrt deutliche Kapazitätssteigerungen möglich werden, allerdings erst dann, wenn neben Lkw auch Pkw die Möglichkeit zur Kolonnenteilnahme haben. Auf-

© VuV 2013

grund ihres vergleichsweise geringen Anteils am Gesamtverkehr sind die positiven Einflüsse von Lkw-Kolonnen begrenzt. Mithilfe der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation VISSIM wurden die Auswirkungen der Kolonnenfahrt bei verschiedenen Anwendungsraten auf einem Autobahnabschnitt betrachtet. In analoger Form wurden die Auswirkungen verschiedener Anwendungsraten an Autobahneinfahrten untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Kolonnenfahrt positive Auswirkungen auf den Verkehrsablauf auf der freien Strecke hat. Auch hier ist die Höhe der Kolonnenanwendungsraten bei Pkw ausschlaggebend. Im Bereich von Autobahneinfahrten ist mit steigendem Anteil der Lkw-Kolonnen mit negativen Auswirkungen für einfahrende Fahrzeuge zu rechnen. Sofern gleichzeitig jedoch ein hoher Anteil an Pkw-Kolonnen vorliegt, werden die Nachteile der Lkw-Kolonnen überkompensiert.

Neben den Auswirkungen der Kolonnenfahrt auf den Verkehrsfluss wurden auch die Auswirkungen auf den Energiebedarf untersucht. Hierzu wurde auf Basis der mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen der Energiebedarf der Fahrzeuge ermittelt. Die Reduktion des Energiebedarfs bei Pkw ist neben einem verringerten Luftwiderstand auch auf einen verbesserten und homogeneren Verkehrsfluss zurückzuführen. Bei Lkw hingegen ist die Energieeinsparung aufgrund ihrer ohnehin weitgehend konstanten Geschwindigkeit im Bereich von 80 km/h hauptsächlich auf den verringerten Luftwiderstand zurückzuführen.

Die Auswirkungen der Kolonnenfahrt auf die Verkehrssicherheit sind nicht direkt zu bestimmen. Die Verwendung der vorgestellten Fahrerassistenzsysteme, die bei der Kolonnenfahrt zum Einsatz kommen, weist jedoch positive Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit auf, wie bereits durch mehrere Studien belegt wird.

Die genannten Auswirkungen der autonomen Kolonnenfahrt auf Verkehrsfluss, Energiebedarf und Verkehrssicherheit beeinflussen schließlich auch die Volkswirtschaft. Zum einen wird die Wirtschaftlichkeit der Fahrzeuge durch einen verringerten Energiebedarf gesteigert, zum anderen können Fahrer von Folgefahrzeugen produktive Tätigkeiten während der Kolonnenfahrt übernehmen. Für die Volkswirtschaft ergeben sich weitere Vorteile durch die Verbesserung der Verkehrssicherheit in Form reduzierter Unfallkosten und durch eine Reduktion der Umweltschäden.

Schließlich kann auch der Reisekomfort auf Autobahnen gesteigert werden. Darunter ist zu verstehen, dass die Fahrer der (hoch-)automatisierten Folgefahrzeuge auf langen Strecken keiner monotonen Fahraufgabe nachgehen müssen. Ihnen ist es stattdessen erlaubt, anderen Tätigkeiten wie beispielsweise Lesen oder Telefonieren nachzugehen.

Alles in allem bietet die autonome Kolonnenfahrt zahlreiche Möglichkeiten, die Negativwirkungen des Verkehrs zu verringern. Aufgrund der aktuellen rechtlichen Beschränkungen autonomer Fahrzeuge ist jedoch mit keiner baldigen Einführung des Systems zu rechnen. Aber auch auf der technischen Seite sind noch zahlreiche Punkte zu klären. Die Einführung der autonomen Kolonnenfahrt wird erst nach einer gewissen

Marktdurchdringung eines standardisierten Fahrzeugkommunikationssystems möglich und sinnvoll sein. Eine Serieneinführung ist dann wiederum zuerst für Lkw zu erwarten, da durch die Ausstattungspflicht von Systemen wie ACC und LDW bzw. LKS der Schritt zum Gesamtsystem der Kolonnenfahrt nicht mehr weit ist, und die Reduktion des Energiebedarfs einen großen wirtschaftlichen Anreiz für die Betreiber von Lkw-Flotten darstellt.

© VuV 2013

12 Verzeichnisse

12.1 Abbildungsverzeichnis

Titelbild: Beispiel einer autonomen Fahrzeugkolonne auf einer Autobahn, online verfügbar unter http://www.euinfrastructure.com/news/road-trains/, heruntergeladen am 14.05.2013

Abbildung 1: Sicherheits- und Komfortfunktionen auf der Basis der Fahrzeug-Umfelderfassung. (Reif, 2010b; S. 110) 16

Abbildung 2: ACC-Funktion, Wechsel von Freifahrt zu Folgefahrt und zurück. (Winner et al., 2012; S. 478) 18

Abbildung 3: Grundstruktur und Komponenten der ACC-Regelung am Beispiel von Distronic (Mercedes-Benz). (Winner et al., 2012; S. 483) 20

Abbildung 4: Schritte zur Zielauswahl und geometrische Größen (rechts). (Winner et al., 2012; S. 496) 23

Abbildung 5: Bremsungen mit und ohne Bremsassistent (BA). (Reif, 2012; S. 78)..... 27

Abbildung 6: Blockdiagramm für ein Bremssystem. (Reif, 2010b; S. 74)..... 30

Abbildung 7: Wirkketten in Pkw-Bremssystemen. (Winner et al., 2012; S. 250) 30

Abbildung 8: EHB am Beispiel der Bosch SBC. (Reif, 2010a; S. 153)..... 32

Abbildung 9: Konzept einer hydraulischen Zahnstangenservolenkung. (Winner et al., 2012; S. 288) 35

Abbildung 10: Prinzipieller Systemaufbau einer achsparallelen elektromechanischen Servolenkung. (Pfeffer & Harrer, 2011; S. 157)..... 37

Abbildung 11: Schnittbild der BMW/ZF-Lenksysteme-Aktivlenkung. (Pfeffer & Harrer, 2011; S. 413) 38

Abbildung 12: Extrembeispiele der Fahrstreifenerkennung, reflektierende Bitumenfugen links, mit Schnee bedeckte Fahrbahn rechts. (Winner et al., 2012; S. 547)..... 41

Abbildung 13: Eingeprägtes Spurhaltehilfsmoment in Abhängigkeit der Spurabweichung von der Fahrstreifenmitte. (Winner et al., 2012; S. 555)..... 42

Abbildung 14: Beispiel für einen Fahrstreifenwechselassistenten. (Winner et al., 2012; S. 569)..... 43

Abbildung 15: Klassifizierung von Assistenzsystemen in Abhängigkeit der menschlichen Informationsverarbeitung. (In Anlehnung an Habenicht, 2012; S. 7 und 8) 46

Abbildung 16: Parallel-simultane (oben), parallel-sequenzielle (mittig) und serielle (unten) Assistenzkonzepte. (Winner et al., 2012; S. 642-644) 49

Abbildung 17: H-Mode Metapher. (Winner et al., 2012; S. 647) 50

Abbildung 18: Einteilung der durch die Umfeldsensorik zu erfassende Bereiche. (Reif, 2010b; S. 130) 52

Abbildung 19: Stufen der Bilderkennung. (Reif, 2010b; S. 205) 56

Abbildung 20: Wirkungsbereiche der Informationssysteme. (Reif, 2010b; S. 107) 59

Abbildung 21: Festeinbaunavigation (BMW, 2013a), Smartphone mit Navigationssoftware (TomTom, 2013a), portables Navigationsgerät (Navigon, 2013). 62

Abbildung 22: Satellitenortungssystem GPS. (Reif, 2010b; S. 193) 63

Abbildung 23: Positionsbestimmung mithilfe von GPS. (Reif, 2010b; S. 194) 64

Abbildung 24: Dopplereffekt. (Reif, 2010b; S. 195) 64

Abbildung 25: Komponenten eines Navigationssystems. (Reif, 2010b; S. 191) 65

Abbildung 26: Datenübermittlung und Datenauswertung mit RDS-TMC. (Reif, 2010b; S. 200) 73

Abbildung 27: Funktionsprinzip für die individuelle Nachrichtenübermittlung. (CB, 2009) 75

Abbildung 28: Optische Darstellung der Verkehrslage bei Echtzeitsystemen. (BMW, 2013b) 76

Abbildung 29: Darstellung von Umleitungsempfehlungen bei Echtzeitsystemen. (BMW, 2013b) 77

Abbildung 30: Automatisches Notrufsystems. (Mercedes-Benz-Notrufsystem, 2012; S. 78) 78

Abbildung 31: Multi-Hop, Nachrichtenübermittlung über mehrere Knoten. (DLR, 2008) 82

Abbildung 32: Unmittelbare und situationsgerechte Nachrichtenübermittlung. (Kosch, 2004) 83

Abbildung 33: Wirkspektrum der verwendeten Technologien. (HAVEit, 2009; S. 5) 93

Abbildung 34: Selbstständiges Durchführen eines Überholvorgangs. (BMW, 2013c) .. 95

Abbildung 35: Funktionsprinzip Nothalteassistent. (AMS, 2010) 96

Abbildung 36: Lkw-Kolonne im Rahmen des KONVOI-Projekts. (BMWi, 2009; S. 17) 98

Abbildung 37: "Road Train" bestehend aus Lkw und Pkw. (SARTRE, 2013) 99

Abbildung 38: Alternativtätigkeiten in einer Fahrzeugkolonne. (Larburu et al., 2010; S. 2) 100

Abbildung 39: Systemübersicht zur autonomen Kolonnenfahrt. 111

Abbildung 40: Möglicher Wirk-/Regelkreis der autonomen Kolonnenfahrt. 113

Abbildung 41: Beschleunigungsfähigkeit in der Ebene (jeweils Fahrzeug-Nullfall). ... 118

Abbildung 42: Anhalteweg in Abhängigkeit vom Kraftschlussbeiwert µ bei Steigung 0 % für Pkw, Lkw und Bus (Lkw und Bus fast deckungsgleich). 121

Abbildung 43: Ermittlung des Folgeabstands in Abhängigkeit von den fahrzeugindividuellen Reaktions- und Bremswegen. 122

Abbildung 44: Ermittelte Folgeabstände für eine Lkw-Kolonne. 124

Abbildung 45: Ermittelte Folgeabstände für eine Reisebus-Kolonne. 126

Abbildung 46: Ermittelte Folgeabstände für eine Pkw-Kolonne. 127

Abbildung 47: Meldung in einem potentiellen Folgefahrzeug über das Angebot zum Anschluss an ein Führungsfahrzeug. (In Anlehnung an BMW, 2013b)..... 132

Abbildung 48: Anzeigefeld zur Unterstützung eines potentiellen Folgefahrzeugs beim Auffinden des Führungsfahrzeugs. (In Anlehnung an BMW, 2013b) 133

Abbildung 49: Integration eines neuen Kolonnenteilnehmers von vorne. (In Anlehnung an Ricardo, 2009) 137

Abbildung 50: Seitliche Integration eines neuen Kolonnenteilnehmers von vorne. (In Anlehnung an Ricardo, 2009) 138

Abbildung 51: Integration eines neuen Kolonnenteilnehmers von vorne bei einem weiteren Lkw hinter dem Führungsfahrzeug. (In Anlehnung an Ricardo, 2009) 141

Abbildung 52: Integration eines Lkw in eine gemischte Fahrzeugkolonne. (In Anlehnung an Ricardo, 2009) 142

Abbildung 53: Anzeigefeld zur Unterstützung des Fahrers eines Folgefahrzeugs bei der Entscheidung über Verbleib oder Austritt aus der Kolonne. (In Anlehnung an BMW, 2013b) 145

Abbildung 54: Verlassen einer Fahrzeugkolonne aus dem Inneren der Kolonne. (In Anlehnung an Ricardo, 2009) 156

Abbildung 55: Auflösen einer Kolonne bei Beendigung der Kolonnenfahrt durch das Führungsfahrzeug. (In Anlehnung an Ricardo, 2009)..... 159

Abbildung 56: Zurückgelegte Wegstrecke bei 120 km/h während der Auflösung einer Pkw-Kolonne in Abhängigkeit der Anzahl der Kolonnenteilnehmer. 160

Abbildung 57: Ausgangszustand vor Überholmanöver. (In Anlehnung an Ricardo, 2009) 163

Abbildung 58: Vergleich zweier Vorgehensweisen beim Fahrstreifenwechsel. (In Anlehnung an Ricardo, 2009) 164

Abbildung 59: Kapazitätsänderung durch Lkw-Kolonnen (Szenario 1). 171

Abbildung 60: Kapazitätsänderung durch Pkw- und Lkw-Kolonnen (Szenario 2). 172

Abbildung 61: Kapazitätsänderungen durch verschiedene Anteile von Pkw- und Lkw-Kolonnen (Szenario 3). 173

Abbildung 62: Summenhäufigkeit der Verlustzeiten für Pkw für verschiedene Kolonnenanwendungsraten nach Szenario 2 (ohne Lkw-Überholverbot). 177

Abbildung 63: Mittlere Reisegeschwindigkeit und Verlustzeit für Pkw bei verschiedenen Kolonnenanwendungsraten nach Szenario 2 (mit Lkw-Überholverbot). 178

Abbildung 64: Mittlere Anzahl der Bremsmanöver für Pkw (oben) sowie Mittelwert des Beschleunigungseffektivwerts für Lkw (unten) bei bestehendem Lkw-Überholverbot und verschiedenen Kolonnenanteilen. 179

Abbildung 65: Mittlere Reisegeschwindigkeiten für Pkw (oben) und Lkw (unten) für steigende Verkehrsstärken und verschiedene Kolonnenanteile (mit Lkw-Überholverbot). 180

Abbildung 66: Ermittlung des Kapazitätsmaximums bei vollständiger Kolonnennutzung auf einer 2-streifigen Autobahn. 182

Abbildung 67: Reisezeit bei verschiedenen Verkehrsstärken auf dem Einfädelstreifen. 185

Abbildung 68: Reisezeit und Anteil blockierter einfahrender Fahrzeuge (Szenario 1). 186

Abbildung 69: Reisezeit und Anteil blockierter einfahrender Fahrzeuge (Szenario 2). 188

Abbildung 70: Reisezeit und Anteil blockierter einfahrender Pkw. 189

Abbildung 71: Einfluss des Folgeabstands auf den c_W-Wert von Pkw in Abhängigkeit vom Folgeabstand (oben) und der Fahrzeuganzahl (unten). (Hucho, 1999; S. 192 und S. 193) 192

Abbildung 72: (Mittlere) Verringerung des c_W-Werts für homogene Lkw-/Bus- und Pkw-Kolonnen. (In Anlehnung an Hucho, 1999; S. 193/399) 193

Abbildung 73: Energiebedarf homogener Lkw- bzw. Bus-Kolonnen im Vergleich zur gleichen Anzahl an Einzelfahrzeugen. 194

Abbildung 74: Energiebedarf einer homogenen Pkw-Kolonne im Vergleich zur gleichen Anzahl an Einzelfahrzeugen. 195

Abbildung 75: Auswirkungen der Kolonnenfahrt auf den Energiebedarf von Pkw (oben) und Lkw (unten) für einen 25 km langen Autobahnabschnitt. 197

12.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bereiche der Umfelderfassung, Umfeldsensorik und Anwendungsbeispiele. 53

Tabelle 2: Definitionen für die autonome Kolonnenfahrt. 104

Tabelle 3: Definition von möglichen Aktionen mit bzw. in einer autonomen Kolonne. 105

12.3 Literaturverzeichnis

ACE Auto Club Europa (2011), *Daten und Fakten: Autobahn-Unfälle – ACE-Studie über Autobahnunfälle*, online verfügbar bei ACE-online unter http://www.ace-online.de/fileadmin/user_uploads/Der_Club/Presse-Archiv/Grafiken/Pm_95.11_Autobahnunfaelle-ACE-Studie.pdf, heruntergeladen am 23.04.2013

ADAC (2010), *Fahrerassistenzsysteme (FAS) für mehr Lkw-Sicherheit*, online verfügbar auf der Homepage des ADAC unter http://www.adac.de/_mmm/pdf/tuz_fas_sp_fas_fuer_Lkwsicherheit_0110_49896.pdf, heruntergeladen am 28.04.2013

ADAC (2013), *Automatischer Notruf mit Standort-Übermittlung*, online verfügbar auf der Homepage des ADAC unter http://www.adac.de/infotestrat/unfall-schaeden-und-panne/ecall_gps_notruf/default.aspx, heruntergeladen am 13.05.2013

AMS (2010), *BMW-Assistenzsysteme – Neue Technik zur Unfallvermeidung*, online verfügbar bei auto-motor-und-sport.de unter http://www.auto-motor-und-sport.de/bilder/bmw-assistenzsysteme-neue-technik-zur-unfallvermeidung-2785827.html?fotoshow_item=1, heruntergeladen am 17.05.2013

Banerjee, A., Würthner, M., Tudosie, C. (2013), Prevision GPS – Die Schaltstrategie für das Getriebesystem Traxon, *ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift*, Heft 06 Juni 2013 (115. Jahrgang), S. 490-493, Springer Vieweg | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

BASt F83 (2012), *Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen – Fahrzeugtechnik Heft F83*, online verfügbar bei der BASt-ELBA unter http://BASt.opus.hbz-nrw.de/volltexte/2012/587/pdf/F83.pdf, heruntergeladen am 19.05.2013

Benmimoun, M., Pütz, A., Zlocki, A., Eckstein, L. (2013), Wirkungsanalyse von Abstandsregelung und Abstandswarnung, *ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift*, Heft 04 April 2013 (115. Jahrgang), S. 336-342, Springer Vieweg | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Bergenhem, C., Huang, Q., Benmimoun, A., Robinson, T. (2010), *Challenges of Platooning on Public Motorways*, online verfügbar auf der SARTRE-Projekthomepage unter http://www.sartre-project.eu/en/publications/Documents/ITS%20WC%20challenges%20of%20platooning%20concept%20and%20modelling%2010%20b.pdf, heruntergeladen am 14.05.2013

BFM (2005), *Am Tempolimit*, online verfügbar bei Busfahrermagazin unter http://www.busfahrermagazin.de/fm/2348/Tempolimit.qxd.pdf, heruntergeladen am 21.05.2013

BMW (2013a), online verfügbar bei der BMW Group unter http://www.bmw.de/de/footer/publications-links/technology-guide/navigations-system.html, heruntergeladen am 08.05.2013

BMW (2013b), *Zurücklehnen vs. Zurückstecken*, online verfügbar bei der BMW Group unter http://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/3er/limousine/2011/komfort.html#idrive, heruntergeladen am 10.05.2013

BMW (2013c), *Mit dem BMW hochautomatisiert auf den Autobahnen Europas*, online verfügbar bei der BMW Group unter https://www.press.bmwgroup.com/pressclub/p/de/pressDetail.html?title=mit-dem-bmw-hochautomatisiert-auf-den-autobahnen-europas-die-bmw-group-und-continental-gehen&outputChannelId=7&id=T0137270DE&left_menu_item=node__2367, heruntergeladen am 10.05.2013

BMW Link (2011), Bedienungsanleitung des Navigationssystems BMW Link für iPhone, Stand 2011

BMW Presse (2009), *Sicherer Halt auch im Notfall*, online verfügbar bei der BMW Group unter https://www.press.bmwgroup.com/pressclub/p/de/pressDetail.html;jsessionid=qHjRRJGZc8FYTKqSmpyhJQTBll5nwNBhYQyJ3l19mt1shTCphTnK!-670475517?title=sicherer-halt-auch-im-notfall&outputChannelId=7&id=T0022635DE&left_menu_item=node__2369, heruntergeladen am 17.05.2013

BMWi (2009), *transport logistic 2009: Intelligent – Innovativ – Integrativ – Herausforderungen der Forschungsförderung für die Logistik*, online verfügbar beim Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie unter http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/transport-und-logisitk-intelligent-innovativ-integrativ-2009,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf, heruntergeladen am 14.05.2013

Breitenberger, S.,Grüber, B., Heuherz, M. (2006), *Extended Floating Car Data – Potenziale für die Verkehrsinformation und notwendige Durchdringungsraten,* online verfügbar bei der BMW Group unter http://www.bmwgroup.com/e/0_0_www_bmwgroup_com/forschung_entwicklung/mobilitaet_verkehr/verkehrsforschung/ExtendedFloatingCarData_Paper_d.pdf, heruntergeladen am 14.05.2013

Burkert, A. (2013), *sim^{TD} Praxistest bestanden: Erfolg schon bei geringer Ausstattungsrate*, online verfügbar bei Springer für Professionals unter http://www.springerprofessional.de/simtd-praxistest-bestanden---erfolg-schon-bei-geringer-ausstattungsrate/4517296.html;jsessionid=DD7199633A4958E24D847927F830814F.sprprofltc0203, heruntergeladen am 26.06.2013

CB (2009), *Medion GoPal P4635*, online verfügbar bei Computerbild unter http://www.computerbild.de /fotos/Medion-GoPal-P4635-4080105.html#6, heruntergeladen am 03.05.2013

C2CCC (2007), *CAR 2 CAR Communication Consortium – Manifesto, Overview of the C2C-CC System,* online verfügbar bei C2C-CC unter http://www.car-to-car.org/index.php?id=31&L=jqn, heruntergeladen am 14.05.2013

Connect (2008), *Großer Stauangriff: HD Traffic: Wie TomTom und Vodafone Staus umfahren,* online verfügbar bei Connect unter http://www.connect.de/ratgeber/hd-traffic-wie-tomtom-und-vodafone-staus-umfahren-374422.html, heruntergeladen am 14.05.2013

Connect (2009), *Navigation: Alles über TMC Pro*, online verfügbar bei Connect unter http://www.connect.de/ratgeber/neue-ziele-374916.html, heruntergeladen am 14.05.2013

Cramer, R (2013), *Das automatisierte Fahren ist eher eine Evolution*, online verfügbar bei INGENIEUR.de unter http://www.ingenieur.de/Themen/Verkehr/Continental-Pilotiertes-Fahren-im-Stau-kommt-2016-Markt, heruntergeladen am 14.05.2013

Daimler AG (2013a), *Der Notbrems-Assistent in Lkw und Bus: Active Brake Assist*, online verfügbar bei der Daimler AG unter http://www.daimler.com/dccom/0-5-1210220-49-1521413-1-0-0-1210338-0-0-135-0-0-0-0-0-0-0.html, heruntergeladen am 02.05.2013

Daimler AG (2013b), *Intelligent Drive: Vernetzt mit allen Sinnen*, online verfügbar bei der Daimler AG unter http://www.daimler.com/dccom/0-5-1597521-49-1597533-1-0-0-1597522-0-0-135-0-0-0-0-0-0-0.html, heruntergeladen am 15.05.2013

Deppe, P. (2013), *Ausblick in die Zukunft: Testfahrt im E-Klasse Entwicklungsfahrzeug mit innovativen Autobahnpilot,* online verfügbar bei MB PassionBlog unter http://blog.mercedes-benz-passion.com/2013/02/ausblick-in-die-zukunft-testfahrt-im-e-klasse-entwicklungs fahrzeug-mit-innovativem-autobahnpilot/, heruntergeladen am 19.05.2013

DLR (2008), Kommunikation von Fahrzeug zu Fahrzeug – DLR nimmt Versuchsfunknetz in Betrieb, online verfügbar bei DLR unter http://www.dlr.de/desktop default.aspx/tabid-79/7421_read-12172/, heruntergeladen am 13.05.2013

EG-Verordnung Nr. 661/2009, *Verordnung (EG) Nr. 661/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Juli 2009 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen, Kraftfahrzeuganhängern und von Systemen, Bauteilen und selbständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge hinsichtlich ihrer allgemeinen Sicherheit*, online verfügbar bei EUR-Lex unter http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:200:0001:0001:DE:PDF, heruntergeladen am 28.04.2013

EG-Verordnung Nr. 347/2012, *Verordnung (EU) Nr. 347/2012 der Kommission vom 16. April 2012 zur Durchführung der Verordnung (EG) Nr. 661/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Typgenehmigung von Notbremsassistenzsystemen für bestimmte Kraftfahrzeugklassen*, online verfügbar bei EUR-Lex unter http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:109:0001:0017:DE:PDF, heruntergeladen am 02.05.2013

EG-Verordnung Nr. 351/2012, *Verordnung (EU) Nr. 347/2012 der Kommission vom 23. April 2012 zur Durchführung der Verordnung (EG) Nr. 661/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Anforderungen an die Typgenehmigung von Spurhaltewarnsystemen in Kraftfahrzeugen*, online verfügbar bei EUR-Lex unter http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:110:0018:0030:de:PDF, heruntergeladen am 02.05.2013

Euro NCAP (2010), *Auszeichnung 2010 – BMW Assist Advanced eCall,* online verfügbar bei Euro NCAP unter http://de.euroncap.com/de/rewards/bmw_assist_advanced_ecall.aspx, heruntergeladen am 14.05.2013

Europäische Kommission (2011), *Lebensrettende Notrufsysteme in Pkw bis 2015*, online verfügbar bei der Europäischen Kommission unter http://ec.europa.eu/deutschland/press/pr_releases/10171_de.htm, heruntergeladen am 14.05.2013

Freymann, R. (2011), *BMW-Forschungsprojekt: Entspannung durch Chauffeur-Computer*, online verfügbar bei SPIEGEL ONLINE unter http://www.spiegel.de/auto/aktuell/bmw-forschungsprojekt-entspannung-durch-chauffeur-computer-a-783577.html, heruntergeladen am 19.05.2013

Gajek, H. (2011), *Wenn Fahrzeuge direkt miteinander sprechen*, online verfügbar bei Communicar unter http://www.communicar.de/magazin/news/wenn_fahrzeuge_direkt_miteinander_sprechen.html, heruntergeladen am 14.05.2013

Gasser, T. M. (2012), *Rechtliche Bezüge intelligenter Fahrzeugsysteme – Braunschweiger Verkehrskolloquium, 02. Februar 2012*, online verfügbar bei DLR unter http://www.sachverstaendigentag21.de/svt2008/downloads/2._Vertrag_-_Prof._Kempen_-_Praesentation.pdf, heruntergeladen am 10.05.2013

German, R. (2007), *Fahrzeugkommunikation – Überblick Intra-/Inter-Fahrzeug-Kommunikation,* online verfügbar bei der Universität Erlangen-Nürnberg unter http://www7.informatik.uni-erlangen.de/~ksjh/teaching/07S/fk/f/pdf/FK-Intro.pdf, heruntergeladen am 14.05.2013

Goppelt, G. (2012), *Road Train: Im Konvoi über die Autobahn*, online verfügbar bei Heise unter http://www.heise.de/autos/artikel/Road-Train-im-Konvoi-ueber-die-Autobahn-1586799.html, heruntergeladen am 19.05.2013

Habenicht, S. (2012), *Entwicklung und Evaluation eines manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenten*, Dissertation an der Technischen Universität Darmstadt, Fachbereich Maschinenbau, Darmstadt

Haken, K.-L. (2008), *Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik*, 1. Auflage, Carl Hanser Verlag, München

Haub, T. (2012), *eCall: Funktionen und Stand der Umsetzung*, online verfügbar bei der Europäischen Kommission unter http://ec.europa.eu/information_society/activities/esafety/doc/ecall/20120417_ecall_deutsch.pdf, heruntergeladen am 14.05.2013

HAVEit (2009), *The future of driving*, online verfügbar bei HAVEit unter http://haveit-eu.org/LH2Uploads/ItemsContent/26/PPT_3.3.3-HAVEit.pdf, heruntergeladen am 16.05.2013

HAVEit (2011), *Highly Automated Vehicles for Intelligent Transport – the future of driving*, online verfügbar bei HAVEit unter http://www.haveit-eu.org/LH2Uploads/ItemsContent/121/HAVEit_Continental_PM_ArchitectureMigrationDemonstrator_D_final_20110621.pdf, heruntergeladen am 16.05.2013

HBS (2005), *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen,* Ausgabe 2001, Fassung 2005, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV)

Herrtwich, R. (2013), *Autonomes Fahren – Die Perspektiven für einen Premiumhersteller*, online verfügbar bei der Automobilwoche unter http://automobilwoche-konferenz.de/rueckblick2013/beitrag_herrtwich.html, heruntergeladen am 31.05.2013

Hoepke, E. (Hrsg.), Breuer, S. (Hrsg.), Appel, W., Brähler, H., Dahlhaus, U., Esch, T., Kopp, S., Rhein, B. (2013), *Nutzfahrzeugtechnik – Grundlagen, Systeme, Komponenten*, 7. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden

Hucho, W.-H. (Hrsg.) (1999), *Aerodynamik des Automobils – Eine Brücke von der Strömungsmechanik zur Fahrzeugtechnik*, 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

IEEE (2010), *Official IEEE 802.11 Working Group Project Timelines,* online verfügbar bei der IEEE Standards Association unter http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Reports/802.11_Timelines.htm, heruntergeladen am 14.05.2013

IKA (2005), *KONVOI – Entwicklung und Untersuchung des Einsatzes von elektrisch gekoppelten Lkw-Konvois auf Autobahnen*, online verfügbar beim Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen University unter http://www.ika.rwth-aachen.de/pdf_eb/gb6-24_konvoi.pdf, heruntergeladen am 17.05.2013

IRT (2013), *TPEG Verkehrs- und Reiseinformationen*, Institut für Rundfunktechnik, München, online verfügbar bei der IRT GmbH unter http://www.irt.de/de/themengebiete/digitaler-hoerfunk/tpeg-verkehrs-und-reiseinformationen.html, heruntergeladen am 14.05.2013

Kalra, N., Anderson, J., Wachs, M. (2009), *Liability and Regulation of Autonomous Vehicle Technologies*, online verfügbar bei der Universität Berkeley unter http://www.its.berkeley.edu/publications/UCB/2009/PRR/UCB-ITS-PRR-2009-28.pdf, heruntergeladen am 11.05.2013

Knake-Langhorst, S., Löper, C., Schebitz, N., Köster, F. (2013), Fahrerunterstützung beim Ein- und Ausfädeln, *ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift*, Heft 04 April 2013 (115. Jahrgang), S. 344-350, Springer Vieweg | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Kosch, T. (2004), *Den Horizont der Fahrerassistenz erweitern: Vorausschauende Systeme durch Ad-Hoc-Vernetzung,* BMW Group Forschung und Technik, online verfügbar bei der TU München unter http://www.ftm.mw.tum.de/uploads/media/18_kosch.pdf, heruntergeladen am 14.05.2013

Krust, M. (2012), *Car-to-Car-Kommunikation kommt ab 2015*, online verfügbar bei der Automobilwoche unter http://www.automobilwoche.de/article/20121015/NACHRICHTEN/121019971/1273/car-to-car-kommunikation-kommt-ab-2015#.UZKei0r2DW4, heruntergeladen am 14.05.2013

Larburu, M., Sanchez, J., Rodriguez, D. J. (2010), *SARTRE: Human factors' aspects in dual mode transport systems*, online verfügbar auf der SARTRE-Projekthomepage unter http://www.sartre-project.eu/en/publications/Documents/T_EU00337.pdf, heruntergeladen am 11.05.2013

Listl, G. (2003), Anwendung neuer Technologien zur Erfassung des Verkehrsablaufs, *Schriftenreihe Verkehr*, Heft 14, Fachgebiet Verkehrssysteme und Verkehrsplanung – Fachgebiet Verkehrstechnik, Universität Kassel, online verfügbar unter http://www.uni-kassel.de/hrz/db4/extern/dbupress/publik/abstract.php?978-3-89958-025-9, heruntergeladen am 14.05.2013

Martens, Pauwelussen, Schieben, Flemisch, Merat, Jamson, Caci (2007), *CityMobil – Human Factors' aspects in automated and semiautomatic transport systems: State of the art*, online verfügbar auf der CityMobil-Projekthomepage unter http://www.citymobil-project.eu/downloadables/Deliverables/D3.2.1-PU-Human%20Factors%20aspects-CityMobil.pdf, heruntergeladen am 13.05.2013

Mercedes-Benz-Notrufsystem (2012), *Mercedes-Benz Notrufsystem*, online verfügbar bei der Mercedes-Benz Niederlassung Nürnberg unter http://www.nuernberg.mercedes-benz.de/content/germany/retailer-9/niederlassung_nuernberg/de/home/passengercars/home/news_events/news/rep_MBNotrufsystem.html, heruntergeladen am 03.05.2013

Möbius, K. (2013), *TPEG – Zuverlässiger Staumelder und mehr,* online verfügbar bei MDR unter http://www.mdr.de/mdr-info/Dab-verkehr100.html, heruntergeladen am 14.05.2013

Navigon (2013), *NAVIGON 92 Premium – Die ansprechendste Art zu navigieren*, online verfügbar bei NAVIGON unter http://www.navigon.com/portal/de/produkte/navigationssysteme/navigon-92-premium-navi-vom-testsieger.html, heruntergeladen am 08.05.2013

Pfeffer, P. Harrer, M. (Hrsg.) (2011), *Lenkungshandbuch – Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen*, 1. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Plößl, K. (2008), *Mehrseitig sichere Ad-hoc-Vernetzung von Fahrzeugen*, 1. Auflage, Gabler | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2009

Popp, K. Schiehlen, W. (2010), *Ground Vehicle Dynamics*, Springer Verlag Berlin Heidelberg

Pudenz, K. (2011a), *Verkehrslage in Echtzeit: Neues Navigationssystem von BMW*, online verfügbar bei Springer Professional unter http://www.springerprofessional.de/verkehrslage-in-echtzeit-neues-informationssystem-von-bmw-13211/3949624.html, heruntergeladen am 14.05.2013

Pudenz, K. (2011b), *Versuchsträger fährt hochautomatisiert auf der Autobahn*, online verfügbar bei Springer Professional unter http://www.springerprofessional.de/versuchstraeger-faehrt-hochautomatisiert-auf-der-autobahn-14550/3951182.html, heruntergeladen am 15.05.2013

Pudenz, K. (2012a), *SARTRE-Projekt: autonome Kolonnenfahrt auf der Autobahn*, online verfügbar bei Springer Professional unter http://www.springerprofessional.de/sartre-projekt-autonome-kolonnenfahrt-auf-der-autobahn/3267266.html, heruntergeladen am 19.05.2013

Pudenz, K. (2012b), *Car-to-X: Autos sprechen ab 2015*, online verfügbar bei Springer Professional unter http://www.springerprofessional.de/car-to-x-autos-sprechen-ab-2015/3643068.html, heruntergeladen am 14.05.2013

Reif, K. (Hrsg.) (2010a), *Bremsen und Bremsregelsysteme*, 1. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Reif, K. (Hrsg.) (2010b), *Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme*, 1. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Ricardo (2009), *Cars that drive themselves can become reality within ten years*, online verfügbar bei RICARDO unter http://www.ricardo.com/en-GB/News--Media/Press-releases/News-releases1/2009/Cars-that-drive-themselves-can-become-reality-within-ten-years/, heruntergeladen am 20.05.2013

Robert Bosch GmbH (2007), *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*, 26. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden

Robert Bosch GmbH (2011), *ESP-Pflicht für neue Automodelle – Schleuderschutz wird zu Serienausstattung*, online verfügbar bei Bosch Media Service unter http://www.bosch-presse.de/presseforum/details.htm?txtID=5412, heruntergeladen am 28.04.2013

Robinson T., Chan, E., Coelingh, E. (2010), *Operating Platoons On Public Motorways: An Introduction To The SARRTE Platooning Programme*, online verfügbar auf der SARTRE-Projekthomepage unter http://www.sartre-project.eu/en/publications/Documents/SARTRE_Overview_Final_Paper_ITS_World_Congress_2010.pdf, heruntegeladen am 11.05.2013

Röbke-Doerr, P. (2006), *Staumelder: Die Unterschiede zwischen TMC und TMC Pro*, online verfügbar bei Heise unter http://www.heise.de/mobil/artikel/Die-Unterschiede-zwischen-TMC-und-TMCpro-223283.html, heruntergeladen am 14.05.2013

SARTRE (2013), Press Image gallery, online verfügbar auf der SARTRE-Projekthomepage unter http://www.sartre-project.eu/en/press/imagegallery/PublishingImages/03%20SARTRE.jpg, heruntergeladen am 19.05.2013

Sautter, U. (2012), *Lkw-Unfall auf der A8: Wieder Unfall mit Testfahrer*, Artikel veröffentlich am 27.06.2012, online verfügbar bei der Südwestpresse unter http://www.swp.de/goeppingen/lokales/voralb/Lkw-Unfall-auf-A8-Wieder-Unfall-mit-Testfahrer;art5775,1518666, heruntergeladen am 28.05.2013

Schlaich, J. (2005), *Nutzungsmöglichkeiten von Floating Phone Data*, online verfügbar bei der Universität Stuttgart unter http://www.isv.uni-stuttgart.de/vuv/publication/downloads_fachkolloquium/Schlaich.pdf, heruntergeladen am 14.05.2013

Schröder, C. (2009), *BMW entwickelt Nothalteassistenten – Auto steuert bei Fahrerausfall autonom Nothalt an*, online verfügbar bei Springer Professional unter http://www.springerprofessional.de/bmw-entwickelt-nothalteassistenten---auto-steuert-bei-fahrerausfall-autonom-nothalt-an-9837/3945630.html, heruntergeladen am 14.05.2013

SimTD (2012), *Projektbroschüre zum Feldversuch*, online verfügbar bei SimTD unter http://www.simtd.de/index.dhtml/2651940c343aec52762k/-/deDE/-/CS/-/backup_publications/Informationsmaterial, heruntergeladen am 15.05.2013

SimTD (2013), *Feldversuch im Rahmen des Forschungsprojektes sim^{TD} belegt: Car-to-X Kommunikation ist reif für den Alltagseinsatz*, Pressemitteilung simTD vom 20.06.2013, online verfügbar unter http://www.simtd.de/index.dhtml/2251cb2eac735465518t/object.media/deDE/8033/CS/-/news/Presse/simTD-Pressemitteilung_2013_DE.pdf, heruntergeladen am 26.06.2013

StVO (2013), *Straßenverkehrs-Ordnung*, Stand 01. April 2013, online verfügbar bei Gesetze im Internet unter http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/stvo_2013/gesamt.pdf, heruntergeladen am 22.05.2013

TLS (2012), *Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen Ausgabe 2012*, online verfügbar bei BASt.de unter http://www.BASt.de/nn_42254/DE/Publikationen/Regelwerke/tls/tls-2012.html, heruntergeladen am 14.05.2013

TomTom (2013a), *Navigation app für Android*, online verfügbar bei TomTom unter http://www.tomtom.com/de_de/products/car-navigation/tomtom-navigation-for-android/index.jsp, heruntergeladen am 08.05.2013

TomTom (2013b), *TomTom HD Traffic – Vorteile*, online verfügbar bei TomTom unter http://www.tomtom.com/de_de/services/live/hd-traffic/#tab:tab2, heruntergeladen am 14.05.2013

Treiber, M., Kesting, A. (2010), *Verkehrsdynamik und -simulation*, *Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik*, Vieweg + Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

VDE.com (2013), *Funktionale Sicherheit – Was ist funktionale Sicherheit?*, online verfügbar bei VDE.com unter http://www.vde.com/de/technik/fs/seiten/fs.aspx, heruntergeladen am 19.05.2013

Viehmann, S. (2010), *Happy Birthday, Cruise Control – 50 Jahre Tempomat*, online verfügbar bei Süddeutsche.de unter http://sz.de/1.293867, heruntergeladen am 24.04.2013

Vogt, W. (2012) *Wirkungsanalysen für Anlagen des Straßenverkehrs*, Skript der Universität Stuttgart, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Lehrstuhl für Straßenplanung und Straßenbau, Wintersemester 2012/2013, Seite 3-10

Wiehen, C. (2013), Technik ist schneller als die Gesetze, *ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift*, Heft 05 Mai 2013 (115. Jahrgang), S. 372-374, Springer Vieweg | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Winner, H., Hakuli, S., Wolf, G. (Hrsg.) (2012), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*, 2. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Winterhagen, J. (2013), Vernetzte Autos sparen 11 Mrd. €, *VDI-Nachrichten*, Ausgabe 26/2013, Seite 1, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf

Wu, N. (2000), Verkehr auf Schnellstraßen im Fundamentaldiagramm, *Straßenverkehrstechnik*, Heft 8, S. 378-388, Kirschbaum Verlag GmbH, Bonn

WÜ-StV (1968), *Gesetz zu den Übereinkommen vom 8. November 1968 über den Straßenverkehr und über Straßenverkehrszeichen, zu den Europäischen Zusatzübereinkommen vom 1. Mai 1971 zu diesen Übereinkommen sowie zum Protokoll vom 1. März 1973 über Straßenmarkierungen*, im Bundesgesetzblatt Teil II vom 21. September 1977 (S. 809-927), online verfügbar beim Bundesanzeiger Verlag GmbH unter http://www.bgbl.de/Xaver/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&jumpTo=bgbl277039.pdf, heruntergeladen am 10.05.2013

Zumkeller, D. (2004), *Grundlage Geschwindigkeit*, online verfügbar bei Risikomanagement Bruno Hersche unter http://www.hersche.at/uploads/uni_karlsruhe_planungsmethodik_verkehr.pdf, heruntergeladen am 17.06.2013

13 Anlagen

Anlage 1: Verwendete Fahrzeugdaten.

Fahrzeugtyp	Fall	Motorleistung P_M [kW]	Motorwirkungsgrad η_M [-]	Fahrzeugmasse m [t]	Drehmassenzuschlag ε [-]	Rollwiderstandsbeiwert f_R [-]	Antriebsschlupf λ_A [-]	Luftwiderstandsbeiwert c_W [-]	Auftriebsbeiwert c_A [-]	Fahrzeugstirnfläche A [m^2]	Wirkungsgrad Antriebsstrang η_A [-]
Pkw	**0**	65	0,35	1,40	0,06	0,01	0,09	0,30	0,1	2,25	0,87
	+	75	0,40	1,25	0,04	0,009	0,07	0,25	0,1	2,00	0,90
	-	55	0,30	1,70	0,10	0,012	0,12	0,35	0,1	2,50	0,85
Lkw	**0**	300	0,35	40,00	1,10	0,009	0,09	0,60	0,0	10,00	0,87
	+	350	0,40	36,00	1,00	0,007	0,07	0,50	0,0	9,00	0,90
	-	250	0,30	40,00	1,20	0,012	0,12	0,80	0,0	11,00	0,85
Bus	**0**	300	0,35	18,00	1,10	0,009	0,09	0,45	0,0	10,00	0,87
	+	350	0,40	22,00	1,00	0,007	0,07	0,40	0,0	9,00	0,90
	-	250	0,30	26,00	1,20	0,012	0,12	0,55	0,0	11,00	0,85

0: Nullfall / +: Oberer Grenzfall / -: Unterer Grenzfall

Getroffene Annahmen zur Ermittlung Beschleunigungsvermögen:

- Vernachlässigung des Reifen-Fahrbahn-Kraftschlusses
- Vernachlässigung dynamischer Achslasten
- Vernachlässigung aerodynamischer Effekte
- Annahme, dass durch Automatikgetriebe die Übersetzung so gewählt werden kann, dass stets die maximale Motorleistung zur Verfügung steht
- Annahme, dass der Drehmassenzuschlag in den hohen Gängen ähnlich ist
- Übliche Vernachlässigungen/Annahmen zur Berechnung der Fahrwiderstände.

© VuV 2013

Fahrzeugtyp	Fall	Reaktions-zeit t_R [s]	Umsetzzeit t_U [s]	Ansprechzeit t_A [s]	Schwellzeit t_S [s]
Pkw	**0**	0,13	0,00	0,05	0,15
	+	0,13	0,00	0,03	0,10
	-	0,13	0,00	0,07	0,20
Lkw	**0**	0,13	0,00	0,05	0,50
	+	0,13	0,00	0,03	0,20
	-	0,13	0,00	0,07	0,70
Reisebus	**0**	0,13	0,00	0,05	0,50
	+	0,13	0,00	0,03	0,20
	-	0,13	0,00	0,07	0,70

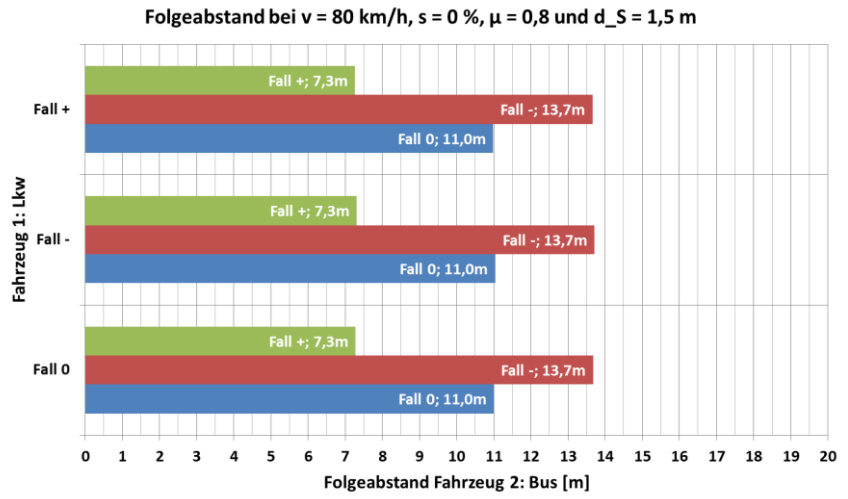
0: Nullfall / +: Oberer Grenzfall / -: Unterer Grenzfall

Getroffene Annahmen zur Ermittlung des Verzögerungsvermögens:

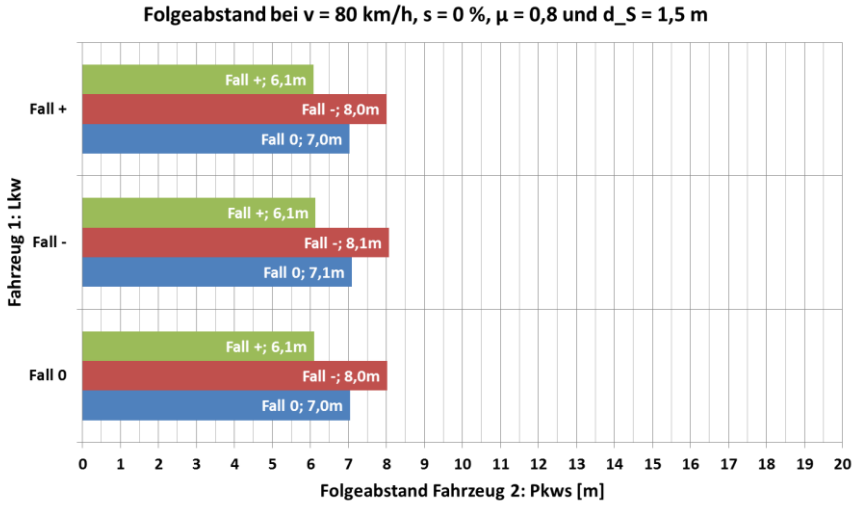
- Vernachlässigung des Längsschlupfs
- Annahme einer idealen Bremskraftverteilung
- Annahme einer maximalen Kraftschlussbeanspruchung
- Annahme, dass Räder nicht blockieren
- Verzögerung während der ersten Hälfte der Schwelldauer null, in der zweiten Hälfte maximal.

© VuV 2013

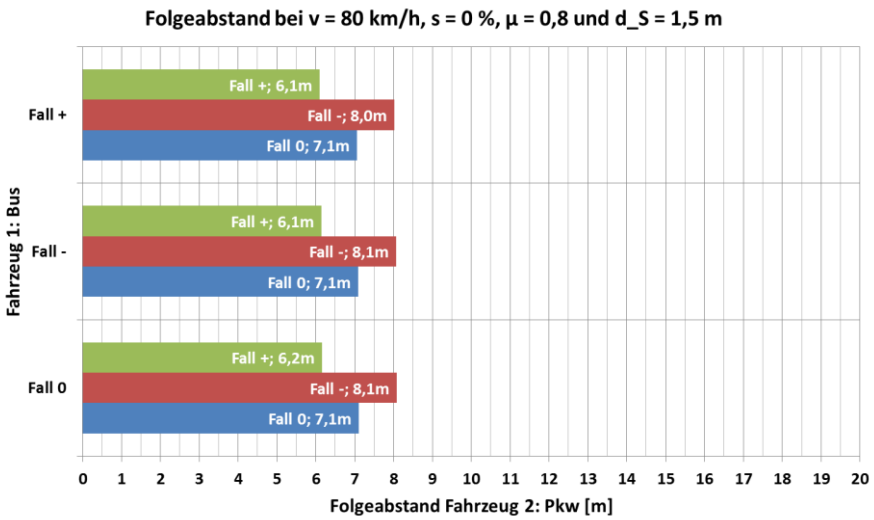
Anlage 2: Folgeabstände


Folgeabstand bei v = 80 km/h, s = 0 %, μ = 0,8 und d_S = 1,5 m
Fahrzeug 1: Lkw
Fall +
Fall -
Fall 0
Fall +; 7,3m
Fall -; 13,7m
Fall 0; 11,0m
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
Folgeabstand Fahrzeug 2: Bus [m]

Folgeabstand Lkw-Bus


Folgeabstand bei v = 80 km/h, s = 0 %, μ = 0,8 und d_S = 1,5 m
Fahrzeug 1: Lkw
Fall +
Fall -
Fall 0
Fall +; 6,1m
Fall -; 8,0m
Fall 0; 7,0m
Fall +; 6,1m
Fall -; 8,1m
Fall 0; 7,1m
Fall +; 6,1m
Fall -; 8,0m
Fall 0; 7,0m
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
Folgeabstand Fahrzeug 2: Pkws [m]

Folgeabstand Lkw-Pkw


Folgeabstand bei v = 80 km/h, s = 0 %, μ = 0,8 und d_S = 1,5 m
Fahrzeug 1: Bus
Fall +
Fall -
Fall 0
Fall +; 6,1m
Fall -; 8,0m
Fall 0; 7,1m
Fall +; 6,1m
Fall -; 8,1m
Fall 0; 7,1m
Fall +; 6,2m
Fall -; 8,1m
Fall 0; 7,1m
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
Folgeabstand Fahrzeug 2: Pkw [m]

Folgeabstand Bus-Pkw

Anlage 3: Theoretische Kapazitätsanalyse

Annahmen und Berechnungsvorgaben:

			Bemerkungen:
Maximale Verkehrsstärke bei	80	km/h	Max. Verkehrsstärke bei 60 … 90 km/h (vgl. Zumwinkel, 2004)
Pkw	85	%	Schwerverkehranteil auf deutschen Autobahnen zwischen 10 und 15 %; gewählt: 15 % (Lkw-Kolonnen stärker repräsentieren)
Lkw	15	%	
Länge_Pkw	4,5	m	gemittelte Länge von Kompakt- und Mittelklasse-Fahrzeugen
Abstand_Pkw_frei	33,33	m	1,5 s Abstand gewählt; dieser Wert ist zwar kleiner als der Wert für den "halben Tacho" (40 m), entspricht bei hohen Verkehrsstärken jedoch eher der Praxis. Mehrere Gerichte haben in der Vergangenheit einen Sicherheitsabstand, der einer in 1,5 s durchfahrenen Strecke entspricht, als ausreichend betrachtet (u.a. BayObLG VRS 62, 380; OLG Köln, VRS 67, 286; OLG Düsseldorf, DAR 78, 188).
Abstand_Pkw_Kolonne	7,2	m	Wert aus Folgeabstandsuntersuchung für 80 km/h
Länge_Lkw	15	m	Längen zwischen 10 und 18,75m, Tendenz zu langen Lkw im Fernverkehr
Abstand_Lkw_frei	50	m	Sicherheitsabstand Lkw über 50 km/h
Abstand_Lkw_Kolonne	11	m	Wert aus Folgeabstandsuntersuchung für 80 km/h
Gesamtzahl Fahrzeuge	2500	Fz/h	Gesamtzahl der Fahrzeuge frei gewählt, um Aufstelllänge der Fahrzeuge berechnen zu können; kein Einfluss auf Endergebnis
Pkw_Anzahl	2125	Fz/h	
Lkw_Anzahl	375	Fz/h	
Pkw_Mittlere_Kolonnenlänge	5,3	Fz	Kolonnen mit 3/5/7/9/11 Fahrzeugen und einer Verteilung von 40/25/20/10/5 %
Lkw_Mittlere_Kolonnenlänge	3,6	Fz	Kolonnen mit 2 bis 7 Fahrzeugen und einer Verteilung von 30/25/20/10/10/5 %
Pkw_Platzbedarf	37,83	m	Fahrzeuglänge + Abstand vor Fahrzeug
Pkw_Kolonne_Platzbedarf	88,14	m	Fahrzeuglängen + Folgeabstände + Abstand vor Führungsfahrzeug
Lkw_Platzbedarf	65	m	Fahrzeuglänge + Abstand vor Fahrzeug
Lkw_Kolonne_Platzbedarf	132,6	m	Fahrzeuglängen + Folgeabstände + Abstand vor Führungsfahrzeug

© VuV 2013

Anlage 4: Randbedingungen Verkehrsflusssimulationen

Anmerkung: hier nicht aufgeführte Parameter entsprechen den VISSIM-Standardeinstellungen.

Fahrzeugtypen:

- *Pkw und Pkw-Kolonnen:* VISSIM-Standardeinstellungen (1) für Maximal- und Wunschbeschleunigung sowie Maximal- und Wunschverzögerung für Pkw
- *Lkw und Lkw-Kolonnen:* VISSIM-Standardeinstellungen (2) für Maximal- und Wunschbeschleunigung sowie Maximal- und Wunschverzögerung für Lkw

Fahrzeugmodellverteilung:

- *Angaben:* Anteil/Fahrzeuganzahl
- *Lkw-Kolonnen:* 0,300/2; 0,250/3; 0,200/4; 0,100/5; 0,100/6; 0,050/7
- *Pkw*-Kolonnen: 0,400/3; 0,250/5; 0,200/7; 0,100/9; 0,050/11

Geschwindigkeitsverteilungen:

- *Angaben:* Geschwindigkeit [km/h] / Summenhäufigkeit, stufige Verteilung um vor allem bei Lkw sehr kleine Geschwindigkeitsdifferenzen zu vermeiden
- *Pkw_Kolonne_130 (für Pkw-Kolonnen)*: 110,00 / 0,000; 110,00 / 0,049; 115,01 / 0,049; 115,01 / 0,146; 119,97/0,146; 120,03/0,799; 1249,99/0,799; 125,04/0,951; 130,00/0,951; 130,00/1,000
- *Lkw_Kolonne_80 (für Lkw und Lkw-Kolonnen):* 80,00/0,000; 80,00/0,201; 82,51/0,201; 82,51/0,399; 85,01/0,399; 85,01/0,597; 87,49/0,597; 87,49/0,799; 90,00/0,799; 90,00/1,000
- *Pkw_Standard (für frei fahrende Pkw):* 90,00/0,000; 90,00/0,045; 100,00/0,045; 100,00/0,146; 110,00/0,146; 110,00/0,299; 120,00/0,299; 120,00/0,500; 130,00/0,500; 130,18/0,753; 140,00/0,754; 140,00/0,903; 150,00/0,955; 160,00/0,955; 160,00/1,000
- Lkw und Lkw-Kolonnen: VISSIM-Standardeinstellungen (2) für Maximal- und Wunschbeschleunigung sowie Maximal- und Wunschverzögerung für Lkw

Anlage 5: Parameter für Fahrzeugfolgemodell nach Wiedemann

Fahrzeugfolgemodell nach Wiedemann:

- *Frei Fahrend („Rechtsfahrgebot (motorisiert)“)*: für frei fahrende Pkw und Lkw (VISSIM-Standardeinstellungen)
- *Kolonne*: für in Kolonne fahrende Pkw und Lkw unter Verwendung von ACC

Modell-parameter	**Beschreibung**	**Einheit**	**Frei Fahrend**	**Kolonne**	**Einfahrende Fahrzeuge**
CC0	Stillstandsabstand	**[m]**	1,50	1,50	1,50
CC1	Folgeabstand	**[s]**	0,90	1,50	0,60
CC2	Längs-Oszillation	**[m]**	4,00	4,00	4,00
CC3	Wahrnehmungs-schwelle für Fol-gen	**[-]**	-8,00	-4,00	-5,00
CC4	neg. Geschwin-digkeitsdifferenz	**[-]**	-0,35	-0,35	-0,35
CC5	pos. Geschwin-digkeitsdifferenz	**[-]**	0,35	0,35	0,35
CC6	Einfluss Geschwindigkeit auf Oszillation	**[-]**	11,44	5,00	11,44
CC7	Beschleunigung bei Oszillation	**[m/s^2]**	0,25	0,25	0,25
CC8	Beschleunigung bei Stillstand	**[m/s^2]**	3,50	3,50	5,00
CC9	Beschleunigung bei 80 km/h	**[m/s^2]**	1,50	1,50	2,50

Spurwechselverhalten

Allgemein gilt: kooperatives Spurwechselverhalten aktiviert

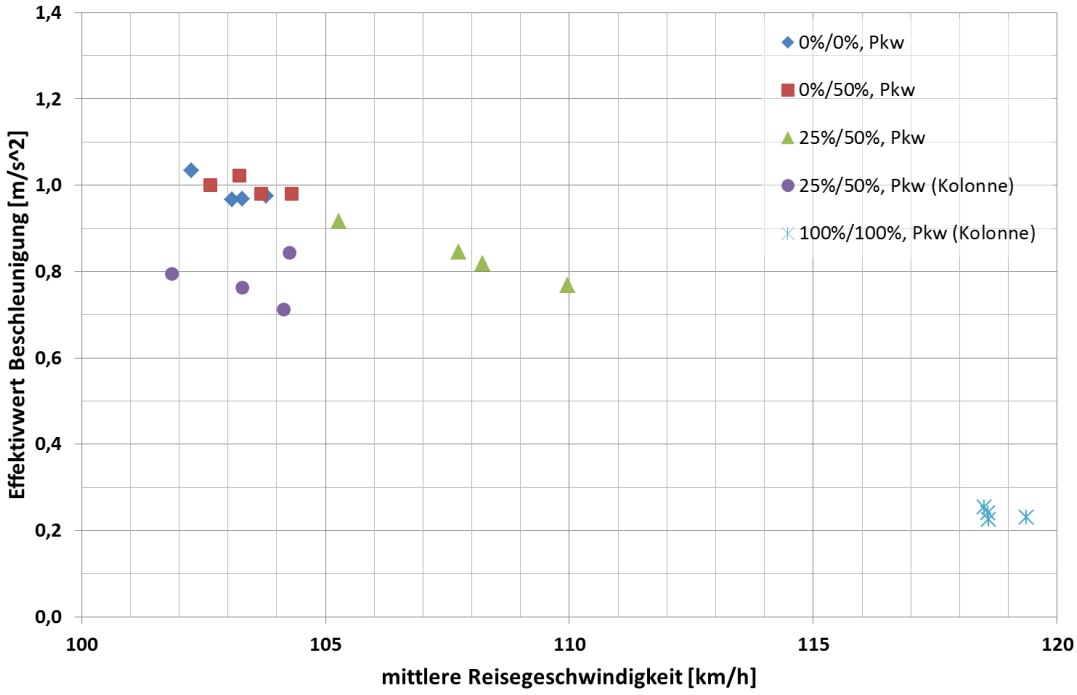
Modell-parameter	Einheit	Frei Fahrend		Kolonne		Einfahrende Fahrzeuge	
		eigene	FoF	eigene	FoF	eigene	FoF
Maximale Verzögerung	[m/s^2]	-4,00	-3,00	-4,00	-3,00	-4,00	-4,00
-1 m/s^2 pro Entfernung	[m]	200	200	200	200	200	200
akzeptierte Verzögerung	[m/s^2]	-1,00	-0,50	-0,50	-0,25	-1,00	-1,50
Wartezeit bis Diffusion	[s]	60,00		60,00		180,00	
Mindest-Nettoweglücke	[m]	0,50		0,50		0,50	
Auf langsamere Spur bei freier Fahrt für mind.	[s]	11,00		3,00		11,00	
Faktor für reduzierten Sicherheitsabstand	[-]	0,60		0,50		0,40	
Maximalverzögerung für kooperatives Bremsen	[m/s^2]	-3,00		-3,00		-3,00	

FoF: Folgefahrzeug

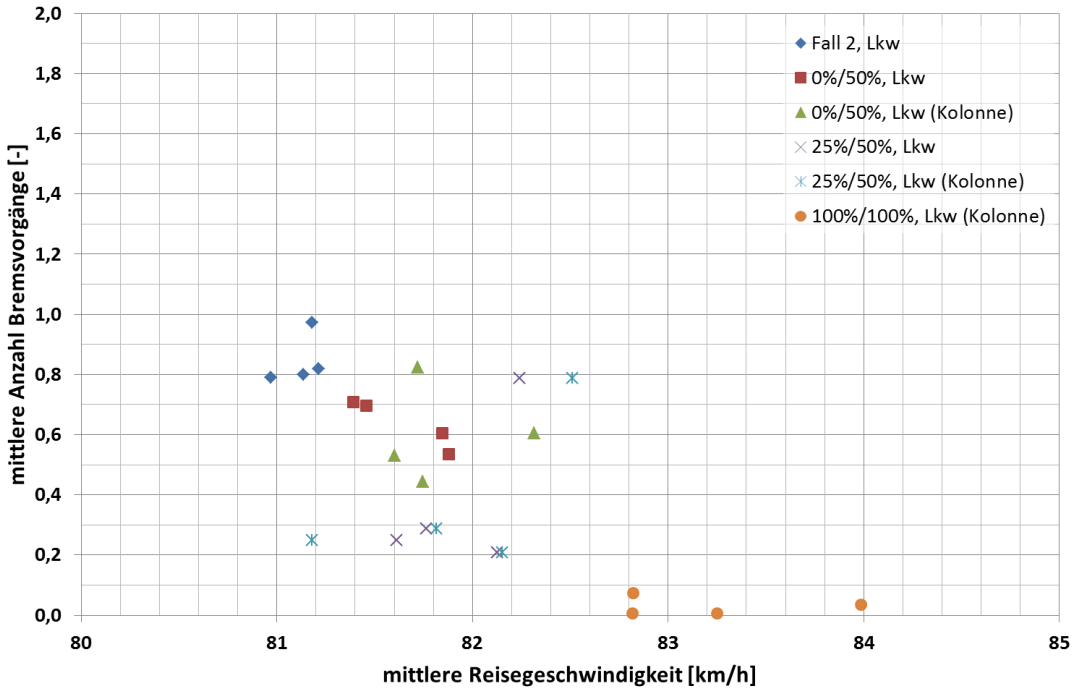
Anlage 6: Reise- und Verlustzeiten der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation

			Kolonnenanteile			Pkw				Pkw_Kolonne				Lkw				Lkw_Kolonne			
Fall	Überholverbot	q [Fz/h]	Pkw	Lkw	gesamt	Reisezeit [s]	Änderung	Verlustzeit [s]	Änderung	Reisezeit [s]	Änderung	Verlustzeit [s]	Änderung	Reisezeit [s]	Änderung	Verlustzeit [s]	Änderung	Reisezeit [s]	Änderung	Verlustzeit [s]	Änderung
Fall 1	ohne ÜV	2500	0%	0%	0%	966,92	+0%	226,91	+0%					1094,20	+0%	32,15	+0%				
Fall 2	mit ÜV	2500	0%	0%	0%	877,20	+0%	137,39	+0%					1108,44	+0%	44,93	+0%				
Fall 3	mit ÜV	2500	0%	25%	4%	877,93	+0%	137,98	+0%					1104,48	-0%	41,47	-8%	1105,67	-0%	36,13	-97%
Fall 4	ohne ÜV	2500	0%	25%	4%	952,73	-1%	212,49	-6%					1089,27	-0%	29,15	-9%	1093,24	-0%	27,89	-97%
Fall 5	mit ÜV	2500	0%	50%	8%	876,61	-0%	135,95	-1%					1101,33	-1%	38,95	-13%	1099,55	-1%	36,94	-97%
Fall 6	ohne ÜV	2500	0%	50%	8%	939,73	-3%	200,26	-12%					1087,25	-1%	25,58	-20%	1083,54	-1%	25,03	-98%
Fall 7	mit ÜV	2500	0%	75%	11%	880,53	+0%	141,59	+3%					1095,36	-1%	31,47	-30%	1094,39	-1%	32,83	-97%
Fall 8	ohne ÜV	2500	0%	75%	11%	930,06	-4%	191,03	-16%					1081,48	-1%	20,77	-35%	1080,88	-1%	21,25	-98%
Fall 9	mit ÜV	2500	0%	100%	15%	883,68	+1%	144,09	+5%									1089,19	-2%	28,76	-97%
Fall 10	ohne ÜV	2500	0%	100%	15%	912,36	-6%	172,30	-24%									1080,81	-1%	18,08	-98%
Fall 11	mit ÜV	2500	25%	25%	25%	841,40	-4%	100,85	-27%	884,45	+1%	136,21	-1%	1101,25	-1%	38,08	-15%	1100,68	-1%	37,10	-97%
Fall 12	ohne ÜV	2500	25%	25%	25%	924,31	-4%	183,33	-19%	957,50	-99%	208,57	-8%	1081,89	-1%	21,74	-32%	1085,92	-1%	23,76	-98%
Fall 13	mit ÜV	2500	25%	50%	29%	846,28	-4%	105,85	-23%	884,85	+1%	137,64	+0%	1098,22	-1%	34,67	-23%	1098,23	-1%	38,17	-97%
Fall 14	mit ÜV	2500	50%	50%	50%	812,69	-7%	72,81	-47%	843,02	-4%	94,35	-31%	1096,68	-1%	34,08	-24%	1097,23	-1%	34,56	-97%
Fall 15	ohne ÜV	2500	25%	50%	29%	910,01	-6%	169,84	-25%	938,57	-97%	187,98	-17%	1079,43	-1%	18,03	-44%	1080,75	-1%	19,13	-98%
Fall 16	ohne ÜV	2500	50%	50%	50%	877,96	-9%	136,65	-40%	903,32	-7%	153,22	-32%	1072,58	-2%	12,02	-63%	1075,22	-2%	12,13	-99%
Fall 17	mit ÜV	2500	25%	75%	33%	841,54	-4%	101,05	-26%	881,67	+1%	132,51	-4%	1094,16	-1%	32,77	-27%	1094,05	-1%	32,23	-97%
Fall 18	mit ÜV	2500	50%	75%	54%	817,46	-7%	76,57	-44%	843,98	-4%	95,84	-30%	1091,75	-2%	29,10	-35%	1089,07	-2%	28,74	-97%
Fall 19	mit ÜV	2500	75%	75%	75%	785,77	-10%	41,18	-70%	799,00	-9%	49,86	-64%	1088,89	-2%	28,08	-37%	1089,73	-2%	29,65	-97%
Fall 20	ohne ÜV	2500	25%	75%	33%	891,02	-8%	151,08	-33%	928,06	-4%	179,31	-21%	1075,44	-2%	15,07	-53%	1077,76	-2%	14,68	-99%
Fall 21	ohne ÜV	2500	50%	75%	54%	867,96	-10%	127,09	-44%	894,50	-7%	146,43	-35%	1071,41	-2%	10,70	-67%	1067,85	-2%	9,70	-99%
Fall 22	ohne ÜV	2500	75%	75%	75%	837,57	-13%	94,46	-58%	858,78	-11%	109,80	-52%	1052,41	-3%	5,73	-82%	1066,43	-3%	7,43	-99%
Fall 23	mit ÜV	2500	25%	100%	36%	846,98	-3%	106,82	-22%	878,21	+0%	129,72	-6%					1086,91	-2%	25,28	-98%
Fall 24	mit ÜV	2500	50%	100%	58%	812,47	-7%	73,06	-47%	837,47	-5%	89,03	-35%					1082,42	-2%	22,87	-98%
Fall 25	mit ÜV	2500	75%	100%	79%	790,76	-10%	45,47	-67%	797,36	-9%	49,24	-64%					1086,49	-2%	21,98	-98%
Fall 26	ohne ÜV	2500	25%	100%	36%	877,15	-9%	137,63	-39%	907,82	-6%	158,46	-30%					1073,47	-2%	12,97	-99%
Fall 27	ohne ÜV	2500	50%	100%	58%	853,03	-12%	112,58	-50%	875,90	-9%	127,48	-44%					1065,33	-3%	7,46	-99%
Fall 28	ohne ÜV	2500	75%	100%	79%	813,13	-16%	70,16	-69%	830,09	-14%	81,97	-64%					1059,80	-3%	4,57	-100%
Fall 29	ohne ÜV	2500	100%	100%	100%					804,54	-17%	55,13	-76%					1052,18	-3%	3,20	-100%
Fall 30	mit ÜV	2500	100%	100%	100%					757,93	-14%	9,16	-93%					1083,68	-2%	22,02	-98%

Anlage 7: Anzahl der Bremsvorgänge und Effektivwerte der Beschleunigung



Effektivwert der Beschleunigung für Pkw



Mittlere Anzahl der Bremsvorgänge für Lkw und Lkw-Kolonnen